

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STAVEBNÍ



Disertační práce

**Možnosti zvýšení účinnosti při vytápění stavebních
objektů biomasou**

**Possibilities of increasing the efficiency of the construction
objects heating by biomass**

Autor:	Ing. Lubomír Martiník
Školitel:	doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek
Datum:	12/2015
Studijní obor:	3607V025 Teorie konstrukcí
Školící pracoviště:	Katedra prostředí staveb a TZB 229

Název:	Možnosti zvýšení účinnosti při vytápění stavebních objektů biomasou
Autor:	Lubomír Martiník, Ing.
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2015, 1. vydání
Počet stran:	121
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Katedra:	Katedra prostředí staveb a TZB 229
Tisk:	VŠB-TU Ostrava
Náklad:	5 ks
ISBN:	978-80-248-3862-5 (autoreferát)

Obsah

1	SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	9
2	ÚVOD	12
3	CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE.....	17
4	LEGISLATIVNÍ RÁMEC	18
4.1	LEGISLATIVA PRO TEPELOVODNÍ KOTLE V ČR A EVROPĚ	18
4.1.1	Požadavky na emisní třídy.....	18
4.1.2	Požadavky na účinnost.....	24
4.2	LEGISLATIVA PRO TEPELNÉ SOUSTAVY V BUDOVÁCH PRO BYDLENÍ.....	26
4.3	EVROPSKÉ STRATEGICKÉ DOKUMENTY	27
5	METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	28
5.1	EXPERIMENTÁLNÍ METODY	28
5.2	VÝPOČTOVÉ METODY	32
5.3	PRAKTICKÉ OVĚŘOVACÍ METODY	40
6	SOUČASNÉ ŘEŠENÍ VYTÁPĚNÍ TUHÝMI PALIVY	42
6.1	PORUCHY A PROBLÉMY STÁVAJÍCÍCH KOTLŮ	44
6.2	PORUCHY STÁVAJÍCÍCH ROZVODŮ ÚSTŘEDNÍHO VYTÁPĚNÍ	46
6.3	REKONSTRUKCE ÚSTŘEDNÍHO VYTÁPĚNÍ.....	48
6.3.1	Výměna armatur.....	48
6.3.2	Výměna otopných těles.....	48
6.3.3	Rekonstrukce potrubní sítě.....	49
6.3.4	Rekonstrukce domovních kotlen, úpraven parametrů a ohříváčů.....	50
6.4	VÝMĚNA MORÁLNĚ ZASTARALÉHO ZDROJE TEPLA.....	50
7	OPTIMALIZOVANÝ AUTOMATICKÝ KOTEL NA VLHKOU BIOMASU	51
7.1	PROBLEMATIKA SPALOVÁNÍ BIOMASY	52
7.2	SPALOVACÍ KOMORA A HOŘÁK.....	53
7.2.1	Hořák H1.....	54
7.2.2	Hořák H2.....	55
7.2.3	Hořák H3.....	55
7.3	KONDENZAČNÍ JEDNOTKA	57
7.3.1	Kondenzační jednotka KJ1.....	57
7.3.2	Kondenzační jednotka KJ2.....	59
7.4	ÚPRAVA PODÁVÁNÍ PALIVA	60
7.5	POŽADAVKY NA ODKOUŘENÍ.....	61

8	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ OPTIMALIZACE KOTLE	64
8.1	ZKOUŠKY KOTLE V KONFIGURACI KJ1 A H1.....	65
8.2	ZKOUŠKY KOTLE V KONFIGURACI KJ1 A H2.....	72
8.3	ZKOUŠKY KOTLE V KONFIGURACI KJ2 A H2.....	73
8.4	ZKOUŠKY KOTLE V KONFIGURACI KJ2 A H3.....	75
8.5	SUMARIZACE ZKOUŠEK	78
9	VARIANTY HYDRAULICKÉHO ZAPOJENÍ KOTLE.....	85
9.1	ZAPOJENÍ S AKUMULAČNÍ NÁDOBOU A PODLAHOVÝM VYTÁPĚNÍM	86
9.2	ZAPOJENÍ DO ROZDĚLOVAČE TOPNÝCH OKRUHŮ	87
9.3	PROPOJENÍ SE VZDUCHOTECHNICKOU JEDNOTKOU	88
9.4	PROPOJENÍ S BAZÉNOVÝM VÝMĚNÍKEM	89
9.5	PŘEDEHŘEV A OHŘEV TEPLÉ VODY	90
10	EKONOMICKÉ ASPEKTY VYUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍHO KOTLE.....	91
10.1	POROVNÁNÍ VARIANT VYTÁPĚNÍ SE STEJNÝMI VSTUPNÍMI PODMÍNKAMI	92
10.2	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VARIANT	94
11	ZÁVĚR	95
12	SUMMARY	98
13	POUŽITÁ LITERATURA	99
14	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	107
15	PŘÍLOHA 1	115
16	PŘÍLOHA 2	117
17	PŘÍLOHA 3	119
18	PŘÍLOHA 4	120

„Rozvoj vědy a pokrok poznání se stávají stále obtížnější. Na experimentování již nestačí zápalky a sláma.“

Richard Philips Feynman

Abstrakt

Disertační práce se zabývá možnostmi využití biomasy pro výrobu tepla, jako náhradu stávajících zařízení pro spalování fosilních paliv ve výstavbě. V této práci je pozornost zaměřena především na objekty s tepelnou ztrátou řádově na úrovni do 100 kW. Nejedná se tudíž o řešení pro rodinné domy.

Automatický kotel na biomasu je jednou z možností, jak ekologizovat vytápění tuhými palivy. Výhodou biomasy je především absence oxidů síry ve spalinách a jejich nulová bilance CO₂ (vývin CO₂ je prakticky stejný při spálení a tlení). Dnes již existuje velké množství zařízení spalujících biomasu. Nevýhodou je ale obtížné sušení (především u štěpky a odpadů ze zemědělství), které je potřebné ke kvalitnímu spálení s vysokou účinností.

Předkládaná disertační práce se zabývá možnostmi zvyšování účinnosti při spalování biomasy a to především biomasy jinak energeticky obtížně využitelné. V rámci této práce je důraz kladen na zařízení pro spalování čerstvé (vlhké) biomasy při maximalizaci účinnosti a aplikací tohoto systému do stavebních objektů. Vysoké účinnosti je u tohoto zařízení docíleno především kondenzační jednotkou, v níž probíhá kondenzace vodní páry ze spalin a díky níž je možné lepší využití energie v palivu. Právě kondenzace vodní páry ze spalin je v této práci zvolena jako nejvhodnější cesta ke zvyšování účinnosti zařízení pro spalování biomasy, jelikož disponuje prozatím nevyužitým potenciálem.

Součástí této práce je také experimentální ověření kondenzačního kotle na biomasu v provozu a využití těchto poznatků pro optimalizaci jednotlivých součástí pro dosažení co nejlepších výsledků účinnosti zařízení při akceptovatelném vývinu emisí znečišťujících látek ze spalování vlhké biomasy. Výsledky těchto experimentů slouží pro lepší poznání dějů, které probíhají ve spalovací komoře a v kondenzační jednotce. Kotle na biomasu využívající princip kondenzace vodní páry ve spalinách představují pravděpodobnou cestu vývoje zařízení pro spalování biomasy v následujících letech.

Klíčová slova:

Biomasa; účinnost; kondenzační princip; spaliny; vysoká vlhkost; kondenzační jednotka

Abstract

This dissertation thesis deals with the possibility of using biomass for heat production, as a replacement for existing facilities for burning fossil fuels in buildings. In this thesis, the attention is mainly focused on buildings with heat loss in the approximate level into 100 kW. Therefore, it is not a solution for family houses.

The automatic biomass boiler is one of the ways, how to make the heating with solid fuels more ecological. The advantage of the biomass is mainly the lack of sulphur oxides in the flue gas and the zero balance of carbon dioxide (CO₂ emissions are practically identical for the burning and rot). Nowadays, there is a large number of facilities for burning the biomass. However, the disadvantage is the hard drying (mainly wood chips and agricultural waste), which is needed for good-quality burning with high efficiency.

This dissertation thesis deals with the possibilities of increasing efficiency in biomass burning, especially biomass which is otherwise energetically uneasily usable. This thesis is emphasized on the device for combustion of fresh (wet) biomass with maximizing the efficiency and application of this system to the buildings. The high efficiency of this device is primarily achieved by condensing unit, in which the condensation of water vapor from the flue gas is realized and which makes possible a better utilization of the energy in the fuel. Condensation of water vapor from the flue gas in this work is chosen as the most appropriate way to increase the efficiency of plants for biomass combustion, as it has so far untapped potentiality.

The experimental verification of condensing biomass boiler in the operation and use of this knowledge for the optimization of individual components to achieve the best efficiency results of the device at acceptable evolution of pollutant emissions from the burning of wet biomass is also part of this work. The results of these experiments are used for better understanding of events which are done in the combustion chamber and the condensing unit. Biomass boilers utilizing the principle of water vapor condensation in the flue gases make probable way of development for biomass combustion in the coming years.

Keywords:

Biomass; efficiency; condensing principle; exhaust gases; high humidity; condensing unit

Poděkování

V úvodu disertační práce bych rád vyslovil upřímné poděkování mému školiteli doc. Dr. Ing. Tadeáši Ochodkovi za cenné rady, připomínky a odborné vedení, které se mi dostávalo v průběhu prací na disertační práci.

Poděkování patří, také Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D., kterému vděčím především za vstřícný přístup při provádění zkoušek a odborné rady.

Práce byla vytvořena za významného přispění celé řady projektů. Jedná se například o projekty:

- „Inovace a modernizace studijního oboru Prostředí staveb“
- „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmu a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO“.
- SGS SP2012/156 - Monitorování kvality vnitřního mikroklimatu v objektu s nízkou potřebou tepla při různých provozních podmínkách
- „Inovace pro efektivitu a životní prostředí“
- SGS SP2013/107 - Energetické využití městské odpadní biomasy
- „Pre-seed aktivity VŠB-TUO - Energetické zdroje“
- SGS SP2014/125 - Měrné emise znečišťujících látek a provozní vlastnosti malých spalovacích zdrojů

Velice rád bych poděkoval své rodině za podporu a všem, kteří se mnou měli trpělivost, pomohli radou či dobrým slovem a během celého studia mi byli oporou. Největší dík patří mé manželce Martině za její nekonečnou trpělivost.

Autor

1 SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Latinská abeceda

A	hmotnostní podíl popele v palivu [1]
CO	mimo chemickou rovnici - objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalínách [% obj.]
CO ₂	mimo chemickou rovnici - objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách [% obj.]
c_{pmatr}	střední měrná tepelná kapacita suchých spalin při normálních podmínkách v závislosti na teplotě a složení spalin [MJ/(K.m ³ _N)]
c_{pmH_2O}	střední měrná tepelná kapacita vodní páry při normálních podmínkách v závislosti na teplotě [MJ/(K.m ³ _N)]
C	hmotnostní podíl uhlíku v palivu [% hm.]
c_w	střední měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě vody [MJ/kg.K]
H ₂	hmotnostní podíl vodíku v palivu [1]
l	měrné skupenské teplo kondenzace vody [MJ/kg]
Δm	hmotnostní úbytek paliva [kg]
M(H ₂)	molární hmotnost vodíku [g/mol]
M(H ₂ O)	molární hmotnost vody [g/mol]
\dot{m}_{H_2O}	hmotnostní tok vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku ve spalovací komoře [kg/h]
$\dot{m}_{kondenzace}$	hmotnostní tok kondenzátu odebraného za 1 hodinu provozu [kg/h]
\dot{m}_{pal}	hmotnostní tok paliva [kg/h]
\dot{m}_{palivo}	hmotnostní tok vody obsažené v palivu spotřebovaném za 1 hodinu provozu [kg/h]
m	hmotnost [kg]
\dot{m}_v	hmotnostní průtok chladicí vody [kg/h]
pH	vodíkový exponent vyjadřující kyselost / zásaditost roztoku

P	tepelný výkon [kW]
P_P	tepelný příkon [kW]
q_a	poměrná ztráta citelným teplem spalin ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]
Q_i	výhřevnost zkušebního paliva [MJ/kg]
Q_n	spalné teplo zkušebního paliva [MJ/kg]
q_r	poměrná ztráta mechanickým nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]
q_s	poměrná ztráta sdílením tepla do okolí ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]
q_u	poměrná ztráta plynným nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]
SO ₂	mimo chemickou rovnici - objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách [% obj.]
S	hmotnostní podíl síry v palivu [% hm.]
t_1	teplota vody na vstupu do kotle [°C]
t_2	teplota vody na výstupu z kotle [°C]
t_a	teplota spalin [°C]
V_{atr}	objem skutečně vzniklých suchých spalin [m ³ _N /kg]
\dot{V}_V	měřený průtok [m ³ /h]
V_w	objem vodní páry ve spalinách [m ³ _N /kg]
W_t	hmotnostní podíl celkové vody v palivu [1]
X	hmotnostní podíl daného prvku v palivu [1]

Řecká abeceda

Δ	rozdíl
η	účinnost [%]
ρ	hustota [kg/m ³]
τ	doba trvání [h]

Indexy

k	kotel
kon	konečná hodnota
kondenzace	kondenzační jednotka
kondenzace, teor.	kondenzační jednotka, teoretická hranice
poč	počáteční hodnota
r (horní)	přepočteno na surový stav
rL (horní)	surový stav zjištěný při laboratorním rozboru
sestavy	sestava kotle a kondenzační jednotky
sestavy, spal	sestava kotle a kondenzační jednotky, přepočet ve vztahu ke spalnému teplu

2 ÚVOD

Zásobování stavebních objektů teplem prochází v dnešní době výraznými změnami, především v oblasti centrálního zásobování teplem (okrskové kotelny, výtopny). Výměníkové stanice centrálního zásobování teplem se postupným vývojem zmenšují a přibližují ke stavebním objektům. Snižují se i dimenze těchto výměníkových stanic, protože dochází k postupnému snižování energetické náročnosti zásobovaných objektů v souvislosti se směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov – tzv. EPBD II (Energy Performance of Buildings Directive) nebo EPBD Recast [1]. EPBD II navazuje na směrnici 2002/91/ES tzv. EPBD I z roku 2002 [2].

Na druhou stranu, potřebou civilizace je ekonomický růst a zvyšování životní úrovně obyvatel. S ekonomickým růstem významně koreluje spotřeba energie, především elektrické [3]. Právě elektrická energie je hybnou silou průmyslu a občanského života ve vyspělých zemích. Účinnost výroby elektrické energie je však velmi rozdílná v závislosti na zdroji. Největší zastoupení má v České republice výroba elektrické energie z páry, která vzniká spalováním pevných paliv. Aby bylo možné dosáhnout co nejvyšší účinnosti, je třeba, aby bylo využíváno odpadní teplo, které vzniká při změně páry zpět na vodu. Tuto problematiku řeší princip kogenerace – tedy společná výroba elektrické energie a tepla.

Centrální zásobování teplem (dále také CZT) přímo souvisí s principem kogenerace a s potřebou využití tepla, vznikajícího při výrobě elektrické energie. Toto teplo by bez využití v CZT bylo bez užitku odváděno. Jelikož cena tepla z CZT vytrvale roste a energetická náročnost stavebních objektů klesá, jsou tyto objekty stále častěji odpojovány od CZT a tento zdroj tepla je nahrazován jiným. V městských aglomeracích jsou to nejčastěji plynové kotelny (stále častěji s využitím kondenzace spalín) a kaskády tepelných čerpadel.

V menších obcích je převážná většina stavebních objektů vytápěna vlastním zdrojem tepla. V případě bytových domů se často jedná o plynové kotelny, nebo kotelny na uhlí. V případě rodinných domů je stále častější návrat ke spalování pevných paliv a to převážně dřeva (výjimky jsou lokální – např. v lokalitách se snadnou dostupností a nízkou cenou uhlí je více zastoupen tento druh paliva). Objevují se ale také okrskové kotelny pro větší množství stavebních objektů v blízkém okolí, které pro výrobu tepla využívají automatické kotle na dřevní štěpku a jiné druhy biomasy [4]. Ty spojují výhody spalování alternativních paliv s komfortem, který poskytuje vytápění plynovým kotlem nebo centrálním zásobováním teplem.

Obnovitelné zdroje energie jsou nyní upřednostňovány díky předpisům Evropské unie, které jsou zapracovány v české legislativě [5]. Jedná se o zdroje energie, které nejsou závislé na omezených zásobách fosilních nebo jaderných paliv. Energii, na které jsou závislé téměř všechny obnovitelné zdroje energie, dodává slunce. To se týká jak solární energie, tak energie větru, vln, vodní energie a biomasy. Všechny tyto zdroje umožňují výrobu elektrické energie [6]. Právě biomasa je zdrojem, který v našich podmínkách nabízí velký potenciál. Ohromné množství sluneční energie, které rostliny zachytí při fotosyntéze a přemění ji na chemickou energii, je srovnatelné s téměř čtyřnásobkem světové spotřeby primární energie [6]. Velkou výhodou biomasy je především tzv. „nulová bilance CO₂“ a fakt, že jde o palivo, které je v našich podmínkách relativně snadno dostupné. V posledních letech je patrný rostoucí trend využívání biomasy pro výrobu energie na úkor těžby černého a hnědého uhlí [7].

Dle akčního plánu pro biomasu v ČR na období 2012-2020 [8] se očekávaný energetický přínos biomasy projeví především v teplárenství (bilanční vyrovnaní možného deficitu hnědého uhlí, snížení emisí a tím i finanční zátěže) a rovněž v elektroenergetice ve formě přímého spalování a spoluspalování biomasy. Tento tlak postupného zvyšování potřeby biomasy, vedle jejího lokálního využití, může vytvářet nežádoucí cenový tlak na tržní cenu biomasy, což v důsledku vyvolává nežádoucí dopady na cenu energie u konečných spotřebitelů (elektrina, teplo). Zmírnění tohoto trendu lze dosáhnout intenzivním využitím především zbytkových druhů biomasy, případně cíleně pěstované biomasy [8].

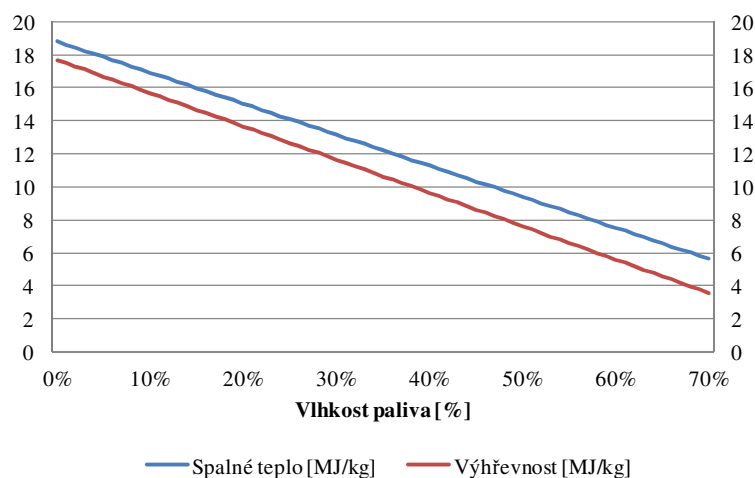
Z doporučení dle [8] vyplývá, že by měla být biomasa využívána přednostně pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (dále také kogenerace nebo KVET) s co nejvyšším energetickým podílem tepla a tím dosahovat vysoké účinnosti energetické přeměny biomasy (nejméně 60 – 70 %). Zároveň je však třeba podotknout, že pro výrobu tepla a elektrické energie ve spalovnách komunálního odpadu je možné využít také směsný komunální odpad (SKO) a komunální odpad (KO). Právě u těchto odpadů je jejich pole využitelnosti v energetice možné pouze ve velkých zařízeních, která jsou nebo mohou být vybavena následným dočištěním emisí znečišťujících látek ve spalinách, které pro spalování biomasy není nezbytné. Je proto vhodné uvažovat o co nejširším využívání biomasy (především z dřevní hmoty) v oblasti malých spalovacích zařízení dle [12] a tím snížit ekologickou zátěž z vytápění domácností (lokálních spalovacích zařízení).

Biomasa, užívaná pro spalování v energetice je dnes téměř výhradně tvořena dřevní štěpkou nebo slámou. Právě dřevní štěrpkou s nízkým obsahem energetické vlhkosti (pro spalování se uvažuje tzv. energetická vlhkost, která je hmotnostním podílem vody obsažené v palivu

k hmotnosti vlhkého paliva) je dnes jako palivo běžně využívána a není zde již tak velký potenciál pro další vývoj v oblasti spalovacích zařízení. Velký potenciál se ukrývá v biomase s vysokým obsahem energetické vlhkosti, která je díky tomu obtížně spalitelná. Vysoký obsah vody v biomase snižuje její výhřevnost a komplikuje spalování. Biomasa o vlhkosti vyšší než 55 % je samostatně nespalitelná (příkladem tohoto typu biomasy jsou mokrá kůra, zelená lesní štěpka, zemědělské odpady a odpady z potravinářské výroby) [13]. Právě tato biomasa je dnes využívána v energetice výhradně ke spoluspalování s jinými palivy.

Stále větší tlak je uplatňován nejen na snížení emisí znečišťujících látek ze spalování, ale také na zvyšování účinnosti. Moderní automatické kotle na biomasu již dnes mnohonásobně podkračují emisní limity dané legislativou a co do účinnosti se blíží plynovým kotlům. Na rozdíl od plynových kotlů se však u kotlů na pevná paliva nevyužívá (až na výjimky) principu využití latentního tepla z kondenzace vlhkých spalin. Vlhkost ve spalinách je dvojího druhu - vlhkost vznikající spalováním vodíku v palivu a vlhkost obsažená v palivu.

Právě množství vody obsažené v palivu má zásadní vliv na výhřevnost a s rostoucí vlhkostí paliva se také zvětšuje propast mezi výhřevností a spalným teplem [14]. Zde je třeba vysvětlit rozdíl mezi výhřevností a spalným teplem, který umožňuje pochopit princip kondenzace při spalování tuhých paliv a její energetický přínos. Celkové množství využitelné energie v palivu je určeno spalným teplem. Nicméně část této energie dříve nebylo možné využít kvůli zachování funkce spalovacího zařízení – tato část se nazývá výparné teplo. Výparné teplo je množství energie potřebné pro odpaření vody v palivu. Čím více vody je v palivu, tím větší je výparné teplo a menší výhřevnost paliva. Závislost výhřevnosti a spalného tepla na jeho vlhkosti je znázorněna na Obr. 1.



Obr. 1 – Závislost výhřevnosti a spalného tepla na vlhkosti paliva [14][15]

Část tohoto rozdílu je dána také obsahem vodíku v palivu, který se při spalování mění na vodu, resp. vodní páru. Nicméně obsah volné vody v palivu má nezanedbatelný vliv.

Kondenzační technika umožňuje díky kondenzaci vody obsažené ve spalinách využít část výparného tepla a tím zvyšuje účinnost spalovacího zařízení (u kondenzační techniky se používá termín normovaný stupeň využití nebo také zjednodušeně relativní účinnost). Pro využívání principu kondenzace vodní páry ve spalinách hovoří především množství tepla, které je ve vodní páře obsažené. Kondenzační teplo (teplo uvolněné změnou skupenství z plynného na kapalné) je totiž řádově větší než teplo, které se uvolní pouhým ochlazením spalin.

Celkové měrné skupenské teplo vypařování (kondenzace) se při normálních podmínkách rovná 2500 kJ/kg, zatímco měrná tepelná kapacita vody je přibližně 4,2 kJ/kg.K [16]. Jedná se tedy o řádově větší množství energie, která se uvolní při skupenské přeměně (kterou tedy můžeme částečně získat zpět pomocí kondenzace vodní páry ze spalin).

Vodní pára ve spalinách má ale velké množství negativ, především vliv na životnost zařízení. Vodní pára při teplotách spalin nižších nebo rovných rosnému bodu t_r kondenzuje a může způsobit korozi částí kotle nebo spalinové cesty. Vznikající kondenzát absorbuje CO_2 (oxid uhličitý) a SO_2 (oxid siřičitý) ze spalin a spolu s nimi tvoří kyseliny H_2CO_3 (kyselina uhličitá), H_2SO_3 (kyselina siřičitá) a H_2SO_4 (kyselina sírová), které leptají povrch oceli. Dále kyslík, který je obsažený ve spalinách, vyvolává elektrolytickou korozi oceli ve vodním prostředí. Aby k takovéto korozi nedocházelo, musí teplota spalin v mezní vrstvě u výhřevných ploch, resp. teplota výhřevných ploch, být vyšší než teplota t_r [17]. V případě kondenzačního kotle je kondenzace žádaným jevem a tomu je třeba přizpůsobit konstrukci jednotlivých komponent. Především kondenzační jednotka musí být vyrobena z materiálů, které odolávají výše zmíněným typům koroze.

Výhodou spalování biomasy je právě minimální obsah síry v palivu. Tím menší je riziko vzniku kyseliny siřičité, potažmo kyseliny sírové a tím nižší je výsledná kyselost ($\text{pH} < 7$) kondenzátu.

Síra se vyskytuje ve všech tuhých palivech a v těžkých topných olejích. Množství síry rozhoduje o tom, jestli je vůbec palivo použitelné, protože má zásadní nepříznivý vliv na všechny jeho kvalitativní ukazatele:

- Zhoršuje výhřevnost (spalné teplo síry je zhruba 1/3 spalného tepla uhlíku)
- Zvyšuje podíl SO_2 ve spalinách odcházejících do ovzduší

- Výrazně snižuje rosný bod spalin (koroze a zalepování výhřevných ploch v oblasti nízkých teplot)
- Způsobuje snížení charakteristických teplot popela (struskové nánosy v oblasti vysokých teplot)
- Přispívá k samovznícení uhlí na skládkách

Množství síry se vyjadřuje buďto jako poměrný obsah síry S [kg/kg; %], vyjádřený podílem v jednotce hmotnosti surového paliva, nebo tzv. měrná sirnatost S, která udává, kolik gramů síry připadá na jednotku výhřevnosti surového paliva [17].

Naproti výhodám biomasy z pohledu absence síry stojí bohužel problém s častým obsahem chloru v biomase a s tím souvisejícím obsahem chloridů, případně HCl (kyselina chlorovodíková) ve spalinách, které také působí korozně na ocelové komponenty kotle a spalinové cesty [18].

Právě chlorová koroze je velkým strašákem konverzí stávajících zařízení pro spalování tuhých paliv na spoluspalování nebo spalování biomasy. U velkých zařízení způsobuje chlorová koroze velké škody na trubkových výměnících kotlů, přehřívácích apod.

Další výhodou biomasy obecně je relativně malé množství popeloviny ve srovnání s fosilními palivy. Popel biomasy je tvořen především směsí oxidů (K_2O – oxid draselný, Na_2O – oxid sodný, CaO – oxid vápenatý, MgO – oxid hořečnatý, Fe_2O_3 – oxid železitý, Al_2O_3 – oxid hlinitý, SiO_2 – oxid křemičitý, P_2O_5 – oxid fosforečný) a celkové množství popela se u biomasy (konkrétně dendromasy) pohybuje kolem 3 – 5 kg při spálení 1 m³ dendromasy [19]. Dendromasa je nadzemní a podzemní hmota stromů – převážně rostlé dřevo.

Největším potenciálem pro zvýšení účinnosti při spalování biomasy disponují kotle, založené na principu využívání latentního tepla z kondenzace spalin. Toto řešení má ale z výše uvedených důvodů nesnadnou pozici, jelikož je třeba využít co největší množství energie z paliva a zároveň maximálně eliminovat nežádoucí jevy, které tento proces provázejí. Tato práce se zabývá jak legislativními, tak technologickými omezeními a možnostmi jejich řešení při vývoji kondenzačního kotle na biomasu, ať už kvalitní, tak také nevhodnou pro přímé spalování (čerstvá nebo příliš vlhká biomasa).

3 CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce shrnuje výsledky přibližně dvouletého vývoje. Cílem práce je především představit alternativu pro vytápění objektů či skupin objektů ke stávajícím zdrojům na tuhá paliva s možností využití odpadní biomasy bez výrazných kvalitativních úprav. Práce se zabývá možnostmi zvýšení účinnosti spalovacích zařízení pro spalování biomasy. Principiálně nejvyšší účinnosti dosahují zařízení s možností využití kondenzace vodní páry ve spalinách.

Cíle disertační práce jsou shrnuty v základních bodech:

- Úprava teplovodního kotle na biomasu pro využití principu kondenzace vody ve spalinách,
- experimentální ověření emisních parametrů za kondenzační jednotkou,
- experimentální ověření regulace a dosahovaných výkonů na kotli a kondenzační jednotce při různých režimech a vlhkostech paliva,
- analýza potřeb kondenzačního kotle na tuhá paliva ve vztahu k systému vytápění a ohřevu teplé vody,
- návrh hydraulického propojení kotle a kondenzační jednotky pro připojení do systému vytápění a ohřevu teplé vody.

Disertační práce poskytuje bližší pochopení spalování vlhkého paliva s nižší výhřevností a možnosti využití ve výstavbě. Přispívá tak k dalšímu poznání v tomto oboru.

4 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

4.1 *Legislativa pro teplovodní kotle v ČR a Evropě*

Pro uvádění teplovodních kotlů na trh je třeba splnit parametry dle normy ČSN EN 303-5:2013 Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení [11]. Na základě této normy se teplovodní kotel certifikuje a dle měření je určena emisní třída kotle. V platnost také vstoupil zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12], který upravuje podmínky, za jakých mohou být kotle provozovány. Dle tohoto zákona dojde k postupnému stahování nižších emisních tříd teplovodních kotlů z prodeje a od roku 2022 již nebude možné teplovodní kotle třídy 1 a 2 provozovat. Kotle emisní třídy 1 a 2 nemohou být v prodeji již od 1. 1. 2014. V porovnání s legislativními požadavky na teplovodní kotle v Německu a Rakousku jsou legislativní požadavky v České republice mnohem shovívavější. V Německu a Rakousku musí teplovodní kotle plnit limity emisí znečišťujících látek ve spalínách jak při uvedení na trh, tak také v reálném provozu, což je pravidelně ověřováno měřením. Takto přísně nastavená legislativa je výhodnější pro automatické kotle, do jejichž provozu může majitel (provozovatel) zasáhnout jen minimálně. Naopak u kotlů staré koncepce s ručním přikládáním má na emise znečišťujících látek vliv mnoho faktorů. Jedná se především o regulaci přívodního vzduchu do spalovací komory a kvalita paliva.

Podporována je výroba tepla z obnovitelných zdrojů [5], což zahrnuje i výrobu tepla z biomasy (pokud se jedná o biomasu z prořezů, jedná se o odpadní biomasu).

Vzhledem ke sbližování evropských předpisů a tlaku na zvyšování účinnosti a snižování emisí znečišťujících látek se do budoucna jeví jako nejpravděpodobnější stále častější využívání automatických kotlů na pevná paliva na biomasu. Právě biomasa obsahuje jen stopové množství síry a je tedy pro čistější spalování lépe využitelná než fosilní paliva.

4.1.1 Požadavky na emisní třídy

V Evropské Unii je základním normativním požadavkem norma EN 303-5:2012 [20], potažmo její česká verze ČSN EN 303-5:2013 Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení [11]. Tato norma rozlišuje 5 emisních tříd, které se liší rozdílnými emisními limity pro oxid uhelnatý (CO), celkový organický uhlík (TOC nebo také OGC) a tuhé znečišťující látky (prach). Do nejnižší emisní třídy spadají zastaralé koncepce prohořivacích kotlů na uhlí či dřevo (prohořivací kotel správně provozovaný na koks je schopen

splnit přísné limity 3 až 4 emisní třídy). Nejvyšší 5 emisní třídu zastupují převážně moderní automatické kotle na biomasu (např. dřevní pelety). Požadované hodnoty dle ČSN EN 303-5:2013 [11] jsou uvedeny v mg/m^3_{N} (miligramy znečišťující látky na objem v metrech krychlových při tlaku 101 325 Pa a teplotě 0 °C – při tzv. normálních podmínkách).

V současnosti platí v Evropě tyto limity:

Tab. 1 – Požadované mezní koncentrace emisí CO ve spalínách dle [11], [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			CO				
			mg/m^3_{N} při 10% O ₂ (mg/m^3_{N} při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Tab. 2 – Požadované mezní koncentrace emisí celkového organického uhlíku (TOC) ve spalínách dle [11], [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			TOC				
			mg/m^3_{N} při 10% O ₂ (mg/m^3_{N} při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)		
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)		
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Tab. 3 – Požadované mezní koncentrace emisí tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [11], [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			Prach				
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ^{2),3)}	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999²⁾ dle nové EN 303-5:2012³⁾ U kotlů emisní třídy 3 pro alternativní biopaliva není třeba splnit požadavek na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³ N při 10% O₂ (145 mg/m³ N při 13% O₂).

Všechny výše uvedené limity (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3) platí pro teplovodní kotle při uvádění zařízení na trh a to jak při jmenovitém výkonu, tak při výkonu sníženém (dříve dle [26] bylo možné uvádět na trh zařízení, která splnila limity pro tuhé znečišťující látky pouze při jmenovitém výkonu).

V České republice jsou omezení dána zákonem č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12], který vychází z požadavků normy ČSN EN 303-5:2013 [11] takto:

Tab. 4 – Požadované mezní koncentrace emisí CO, TOC a tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [12] od 1. 1. 2014 [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon (kW)	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ^{2),3)}	Prach (TZL)
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂) ¹⁾		
Ruční	Biologické	≤ 65	5 000 (3 636)	150 (109)	150 (109)
		> 65 až 187	2 500 (1 818)	100 (73)	150 (109)
		> 187 až 300	1 200 (873)	100 (73)	150 (109)
	Fosilní	≤ 65	5 000 (3 636)	150 (109)	125 (91)
		> 65 až 187	2 500 (1 818)	100 (73)	125 (91)
		> 187 až 300	1 200 (873)	100 (73)	125 (91)
Samočinná	Biologické	≤ 65	3 000 (2 182)	100 (73)	150 (109)
		> 65 až 187	2 500 (1 818)	80 (58)	150 (109)
		> 187 až 300	1 200 (873)	80 (58)	150 (109)
	Fosilní	≤ 65	3 000 (2 182)	100 (73)	125 (91)
		> 65 až 187	2 500 (1 818)	80 (58)	125 (91)
		> 187 až 300	1 200 (873)	80 (58)	125 (91)

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalínům, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 % (k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %)²⁾ TOC = OGC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti.

Z výše zmíněné tabulky Tab. 4 plyne, že česká republika zavádí stejné požadavky jako EN 303-5:2012 [20] a ČSN EN 303-5:2013 [11] s tím rozdílem, že skupiny rozdělené dle výkonu jsou zde nahrazeny skupinami rozdělenými dle příkonu, které po přepočtu na výkon odpovídají stejnému rozdělení. Dá se tedy říci, že teplovodní kotel je možno dle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12] uvádět na trh po 1. 1. 2014 pouze zařízení emisní třídy 3 a výše dle [11]. To v praxi znamená omezení provozu starších prohořivacích a odhořivacích kotlů a procentuálně vyšší zastoupení automatických a pyrolytických kotlů v domácnostech. Prohořivací a odhořivací kotle je například možné nadále prodávat jako kotle vyšších tříd v případě záměny paliva, pro které jsou certifikovány. Kotel, byť zastaralé konstrukce při spalování koksu může dosahovat velmi dobrých výsledků díky charakteristice paliva.

Od září 2022 již nebude možné provozovat kotle emisních tříd 1 a 2, což znamená nejen omezení na straně uvádění výrobku na trh, ale také omezení na straně provozovatele (domácností). Dle § 23, odst. 2 b) zákona č. 201/2012 Sb. [12] je možné uložit provozovateli pokutu ve výši až 50 000 Kč.

Další omezení je dle zákona č. 201/2012 Sb. [12] naplánováno na 1. 1. 2018. Po tomto datu již bude možné uvádět na trh pouze kotle emisní třídy 4 a výše, pro něž prozatím není stanoven termín zákazu provozování – viz Tab. 5.

Tab. 5 – Požadované mezní koncentrace emisí CO, TOC a tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [12] od 1. 1. 2018 [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon (kW)	Mezní hodnoty emisí ³⁾		
			CO	TOC ²⁾ 3)	Prach (TZL)
			mg/m ³ N při 10 % O ₂ (mg/m ³ N při 13 % O ₂) ¹⁾		
Ruční	Biologické / Fosilní	≤ 300	1 200 (873)	50 (36)	75 (55)
Samočinná	Biologické / Fosilní	≤ 300	1 000 (727)	30 (22)	60 (44)

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalínám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 % (k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %)

²⁾ TOC = OGC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti.

Některé evropské země disponují vlastními legislativními úpravami. Našimi nejbližšími trhy s vlastními legislativními požadavky jsou Německo a Rakousko. Tyto dvě země jsou v oboru spalovacích zařízení spolu s USA jedněmi z nejprísnejších z pohledu schvalování a následného

monitorování emisí znečišťujících látek a jejich národní požadavky jsou v mnohém přísnější než požadavky společné evropské normy EN 305-5:2012 [20].

V Rakousku jsou přísné národní požadavky stanoveny dohodou 15a B-VG (2011) [22] viz Tab. 6 a Tab. 7. Výše zmíněná dohoda platí pro spalovací zařízení do výkonu 400 kW. Rakouské předpisy uvádějí limity v mg/MJ (miligramy znečišťující látky na množství energie, která je do kotle vložena v palivu – vychází z výhřevnosti paliva). Pro porovnání rakouských požadavků s ostatními evropskými požadavky je třeba tyto limity převést na stejnou veličinu. V rakousku je celkový organický uhlík TOC značen jako OGC.

Tab. 6 – Požadované mezní koncentrace emisí CO, NO_x, TOC a tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [22] pro kotle s ruční dodávkou paliva [21]

Parametr	Emisní limity [mg/MJ]					
	Dřevěná paliva		Ostatní standardizovaná biogenní paliva		Fosilní paliva	
	Lokální spotřebiče	Kotle pro ústřední vytápění	< 50kW jmenovitého výkonu	> 50kW jmenovitého výkonu	< 50kW jmenovitého výkonu	> 50kW jmenovitého výkonu
CO	1100	500	1100	500	1100	500
NO _x	150	150/100 ^a	300	300	100	100
TOC	80/50 ^a	50/30 ^a	50	30	80	30
Prach (TZL)	60/35 ^a	50/30 ^a	60/35 ^a	60/35 ^a	50/35 ^a	50/35 ^a

^a hodnoty platné od 1.1.2015

Tab. 7 – Požadované mezní koncentrace emisí CO, NO_x, TOC a tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [22] pro kotle s automatickou dodávkou paliva [21]

Parametr	Emisní limity [mg/MJ]			
	Dřevěné pelety Lokální spotřebiče	Dřevěné pelety Kotle pro ústřední vytápění	Ostatní dřevěné palivo	Ostatní standardizovaná biogenní paliva
CO	500 ^a	250 ^a	250 ^a	500 ^a
NO _x	150/100 ^b	150/100 ^b	150/100 ^b	300
TOC	30	30/20 ^b	30	30/20 ^b
Prach (TZL)	50/25 ^b	40/20 ^b	50/30 ^b	60/35 ^b

^a mezní hodnota může být překročena o 50 % během zkoušky sníženého výkonu - 30 % jmenovitého výkonu

^b hodnoty platné od 1.1.2015

Německá vyhláška 1. BImSchV (2010) [23] zpřísňuje limity pro koncentraci oxidu uhelnatého a prachu (TZL) – viz Tab. 8.

Tab. 8 – Požadované mezní koncentrace emisí CO a tuhých znečišťujících látek (prachu) ve spalínách dle [21], [23]

	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	¹⁾ Prach (TZL) [mg/m ³ _N]	¹⁾ CO [mg/m ³ _N]
Zdroje instalované po 22.3.2010 - Etapa 1	Černé uhlí, hnědé uhlí, rašelina	≥ 4 až 500	90	1 000
		> 500	90	500
	Přírodní dřevo kusové, štěpka, piliny	≥ 4 až 500	100	1 000
		> 500	100	500
	Dřevní pelety, brikety	≥ 4 až 500	60	500
		> 500	60	500
	Povrchově upravené dřevo, překližky	≥ 30 až 100	100	800
		> 100 až 500	100	500
		> 500	100	300
Zdroje instalované po 31.12.2014 - Etapa 2	Uhlí, rašelina, dřevo, štěpka, piliny, dřevní pelety a brikety	≥ 4	20	400
		≥ 30 až 500	20	400
	Povrchově upravené dřevo, překližky	> 500	20	300
		≥ 4 až 100	20	400

¹⁾ vztahuje se k suchým spalínám, teplotě 273,15 K a tlaku 101,325 kPa a při referenčním O₂ = 13 %

V obou těchto zemích (Rakousko i Německo) je navíc požadavek na kontroly také v provozu. To v praxi znamená, že se jednou za dva roky musí kotle podrobit kontrole a měření emisí CO, tak jak je tomu u automobilů. V případě německých požadavků je dále povinné měření koncentrace prachu, v případě Rakouska je třeba splnit maximální povolenou komínovou ztrátu, která tvoří největší podíl na ztrátách kotle (v zásadě se jedná o ověření účinnosti zařízení s tím, že měření komínové ztráty je relativně jednoduchá procedura, kterou je možné realizovat in-situ). Požadované limitní hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 – Požadované mezní koncentrace emisí CO ve spalínách a komínová ztráta dle [22] při pravidelných ověřovacích měřeních [21]

Limity	Ruční přikládání	Automatické přikládání
Komínová ztráta [%]	20	19
CO [mg/m ³ _N]	3500	1500

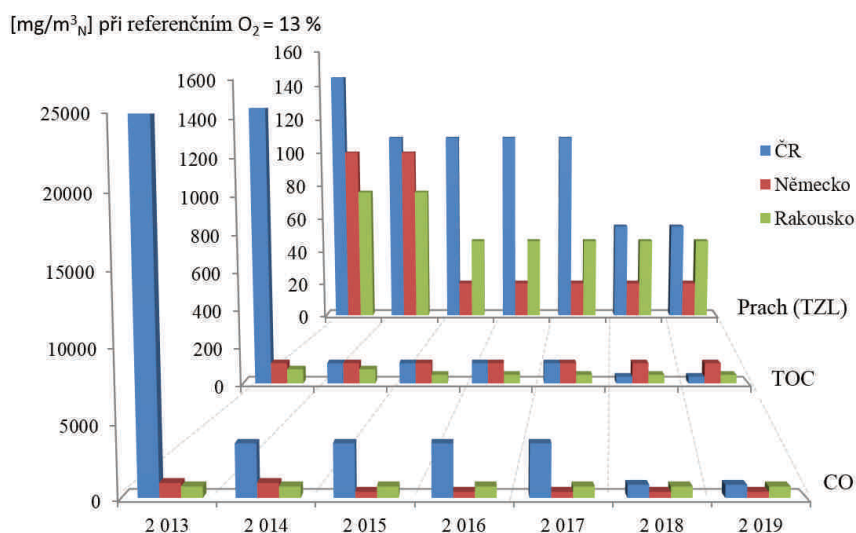
Limity pro biogenní paliva se vztahují k referenčnímu O₂ = 11 %, pro fosilní paliva k referenčnímu O₂ = 6 %

Jak bylo již výše uvedeno, požadavky rakouských předpisů jsou uvedeny v mg/MJ, zatímco ostatní evropské požadavky (vč. Německa) jsou uvedeny v mg/m³_N. Aby byly tyto požadavky vzájemně porovnatelné, je třeba je převést na stejnou veličinu. Srovnání těchto limitů je nutné

provádět přepočtem přes výhřevnost paliva a množství spalin, které vzniknou spálením 1 kg paliva (v případě Rakouska). Pro přibližný přepočet mohou být použity tyto hodnoty:

- biogenní paliva: výhřevnost $Q_i^r = 14,6 \text{ MJ/kg}_{\text{paliva}}$ [24]; měrný vývin spalin $10,2 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg}_{\text{paliva}}$ (13 % O_2) - dřevo
- fosilní paliva: výhřevnost $Q_i^r = 17,6 \text{ MJ/kg}_{\text{paliva}}$; měrný vývin spalin $12,7 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg}_{\text{paliva}}$ (13 % O_2) - hnědé uhlí [25]

Pro srovnání jsou na následujícím obrázku (Obr. 2) znázorněny limitní požadavky na emise znečišťujících látek ze spalování dle požadavků jednotlivých zemí. Na emise tuhých znečišťujících látek jsou nejprísnejší německé požadavky 1. BImSchV (2010) [23], CO a celkový organický uhlík je nejprísnejši limitován rakouskou dohodou 15a B-VG (2011) [21][22].



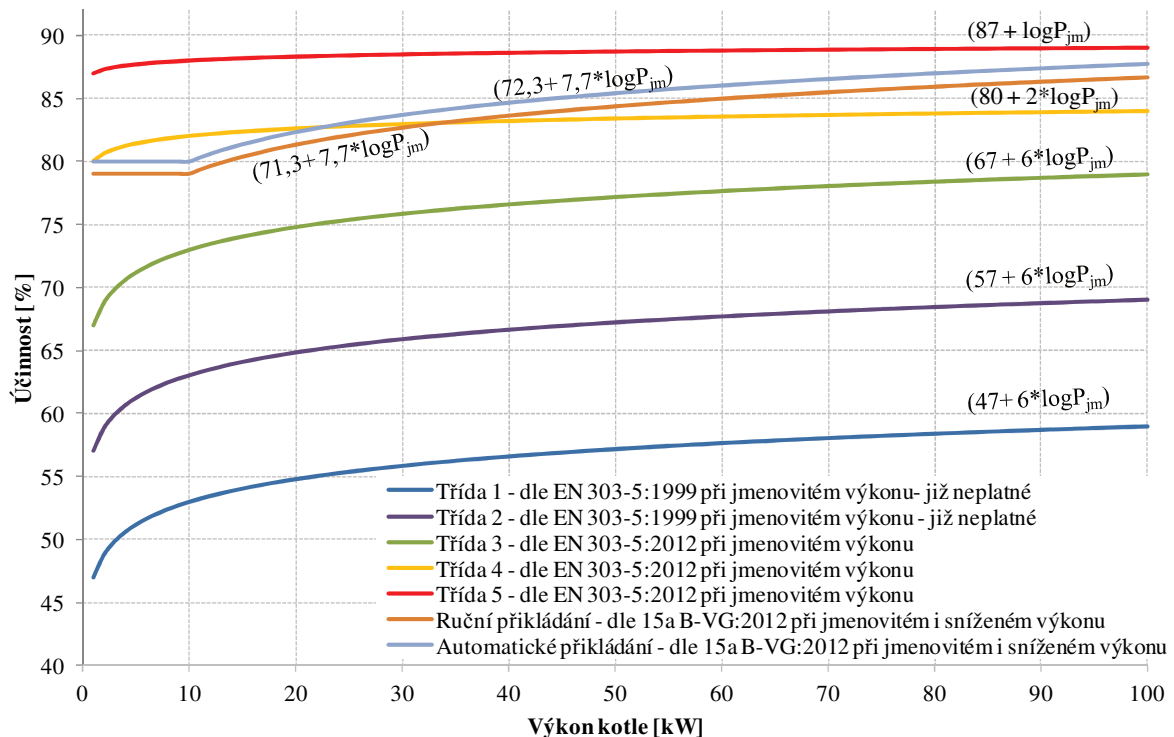
Obr. 2 – Graf srovnání požadavků na emise pro konkrétní teplovodní kotel s ručním přikládáním kusového paliva o výkonu 25kW dle [11], [12], [21], [22], [23]

4.1.2 Požadavky na účinnost

Česká legislativa neupravuje požadavky na účinnost kotlů na tuhá paliva. Požadavky na účinnost jsou pokryty normou ČSN EN 303-5:2013 Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení [11]; resp. její evropskou verzí EN 303-5:2012 [20].

V níže zobrazeném grafu (Obr. 3) jsou zaneseny požadavky výše zmíněné normy a pro srovnání také požadavky dřívější verze normy (třída 1 a 2) a požadavky rakouských

předpisů 15a B-VG (2011) [22]. Německé předpisy [23] nepožadují přísnější limity na účinnost.



Obr. 3 – Graf požadavků na účinnost teplovodních kotlů dle [20], [21], [22][23], [26]

V případě rakouských předpisů se jako nejprísnejší požadavek jeví potřeba splnit minimální hodnoty účinnosti jak při jmenovitém, tak při sníženém výkonu (při uvedení na trh). Právě při provozu kotle na snížený výkon bývá účinnost obecně nižší, protože spalovací komora je příliš velká pro relativně malé množství spalovaného paliva a nedochází k udržení optimálního přebytku spalovacího vzduchu.

Je třeba si uvědomit, že dílčí měření účinnosti (komínové ztráty) probíhá v případě rakouských předpisů také pravidelně ve dvouletých intervalech i u provozovatele (v domácnostech), pokud zařízení do 50 kW spaluje uhlí nebo standardizovaná biogenní paliva. V případě, že zařízení disponuje výkonem nad 50 kW nebo spaluje nestandardizovaná biogenní paliva, musí prokázat plnění limitů včetně komínové ztráty jednou ročně. Je tedy třeba, aby tato zařízení splnila požadavky s dostatečnou rezervou a bylo reálné, aby bylo těchto limitů dosaženo i po několika letech provozu. To opět nahrává především automatickým kotlům, jejichž výsledky měření emisí tolik nezávisí na obsluze a je možné dosáhnou těchto výsledků i mimo zkušebnu.

4.2 Legislativa pro tepelné soustavy v budovách pro bydlení

Nejdůležitějším parametrem budov pro vytápění je jejich potřeba tepla. Návrh zdroje tepla vychází z potřeby tepla objektu. Pro výpočet potřeby tepla a tepelných ztrát se užívá norma ČSN EN 12831:2005 – Tepelné soustavy v budovách – Výpočet tepelného výkonu [27].

Norma ČSN EN 12828 + A1:2014 – Tepelné soustavy v budovách – Navrhování teplovodních otopných soustav [28] se zabývá návrhem teplovodních otopných systémů (zdroje tepla, distribuce, otopné plochy, regulace).

Výše zmíněná legislativa řeší především propojení kotle a distribučního systému vytápění a požadavky na provedení celého systému pro co nejvyšší efektivitu provozu.

Na systémy vytápění se vztahuje také vyhláška 194/2007 Sb. kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími a registrujícími dodávku tepelné energie [29]. Ta byla doplněna vyhláškou 237/2014 Sb. kterou se mění vyhláška č. 194/2007 Sb. kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími a registrujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům [30]. Tato vyhláška především nařizuje osadit distribuční prvky vytápění zařízeními pro registraci spotřebovaného tepla (z důvodu rozdělování nákladů na vytápění). V případě společné přípravy teplé vody musí být jednotlivé byty osazeny vodoměry na teplou vodu. Tato vyhláška má v praxi umožnit spravedlivější rozpočítání nákladů na vytápění a celkově snížit spotřebu energie pomocí ekonomické motivace k úsporám. Dopady tohoto řešení jsou v odborných kruzích živě diskutovány a názory na účinnost tohoto řešení se různí. K nejčastějším výtkám patří především nesmyslnost celkového rozpočítání pouze dle přesných měřících zařízení, protože poloha bytové jednotky a technologie v objektu mají vliv na potřebu tepla v jednotlivých bytových jednotkách. Mimo tento argument je zde také otázka přílišné fixace na přesnou spotřebu a s tím spojené nedostatečné vytápění a potažmo ochlazování okolních bytových jednotek. Právě i z tohoto důvodu má od ledna 2016 nabýt účinnosti vyhláška č. 269/2015 Sb. [31], která mění poměr základní a spotřební složky ve prospěch základní složky nákladů objektu.

Pro hodnocení celkové účinnosti systému vytápění je důležitý zákon 406/2000 Sb. o hospodaření energií [32], který mj. stanoví některá opatření pro zvyšování hospodárnosti užití energie a povinnosti fyzických a právnických osob při nakládání s energií. V oboru stavebnictví

je největším dopadem úprava povinností při zpracování energetického průkazu budov. Z hlediska energetického je to především zavedení přísnějších limitů emisí znečišťujících látek.

4.3 Evropské strategické dokumenty

Evropský parlament prosazuje obnovitelné zdroje energie s důrazem na stanovení povinných cílů pro rok 2020 (v tomto období také 2030 – viz [33]). Evropský parlament vyzývá k závaznému cíli vyrábět 30 % spotřeby energie na úrovni Evropské unie (EU) z obnovitelných zdrojů. Evropský parlament také vyzývá k zavedení systému pobídek pro obnovitelné zdroje [34].

Současná evropská politika řeší v souvislosti s životním prostředím především boj proti klimatickým změnám a znečištění (ovzduší, voda, hluk apod.). Z tohoto důvodu byl přijat tzv. klimaticko-energetický balíček, v němž je obsažena směrnice o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů [35], směrnice modifikující systém obchodování s emisními povolenkami [36], směrnice o geologickém ukládání oxidu uhličitého [37] či rozhodnutí týkající se úsilí členských států snížit emise skleníkových plynů o 30 % v rámci Společenství do roku 2020, které je nyní doplněno usnesením Evropského parlamentu [33], které má za cíl tuto koncepci prodloužit do roku 2030.

Energetickou účinností se zabývá směrnice 2012/27/EU [38], která nahrazuje směrnice 2006/32/ES, 2004/8/ES a doplňuje směrnice 2009/125/ES [39] a 2010/30/EU. Tato směrnice zavádí společný rámec opatření na podporu energetické účinnosti v Unii s cílem zajistit do roku 2020 splnění hlavního 20 % cíle Unie pro energetickou účinnost a vytvořit podmínky pro další zvyšování energetické účinnosti i po tomto datu [38].

Právě směrnice 2009/125/ES [39] nově zavádí požadavky na ekodesign kotlů (vyšlo ve věstníku EU 21. 7. 2015 [40]) a také zavádí hodnocení účinnosti kotlů na základě spalného tepla a zpřísňuje požadavky na účinnost kotlů, která je nyní váženým průměrem na základě ročního využití kotle (85 % pro snížený výkon, 15 % pro jmenovitý výkon). U kotlů do 20 kW je minimální hodnota účinnosti ve vztahu ke spalnému teplu stanovena na 75 %, u kotlů nad 20 kW (pod 500 kW) je minimální hodnota účinnosti stanovena na 77 % [41]. V praxi se u požadavků na ekodesign jedná o rozšíření požadavků na emisní třídu 5 dle normy EN 303-5 [11][20].

5 METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Metody použité při řešení disertační práce si kladou za cíl posoudit a vyhodnotit veškeré vlivy jednotlivých úprav sestavy kondenzačního kotle na jeho výkonové a emisní parametry. Pro vyhodnocení všech vlivů jsou využity základní vědecké metody s deskriptivním přístupem, které umožňují kvantifikovat současný stav poznání a aplikovat jej na řešenou problematiku.

Metody řešení disertační práce, směřují ke splnění cílů (viz kap. 3), a lze je rozdělit na tyto tři soubory metod:

- Experimentální metody
- Výpočtové metody
- Praktické ověřovací metody

5.1 Experimentální metody

Experimentální metody jsou založeny na testování prototypového řešení automatického kotle na zkušebně. V rámci testování se při provozu zařízení měří jednotlivé veličiny kalibrovanými měřicími zařízeními.

Tepelný výkon předaný vodě (jak pro kotel, tak pro kondenzační jednotku) je určen tak, že se zkoušené zařízení hydraulicky připojí ke zkušební smyčce a provozuje se dle doporučení výrobce a požadavků příslušných norem, měřicí smyčka je uvedena do provozu a propojena s PC, výpočet tepelného výkonu je proveden dle vztahu (1) [42][43].

$$P_k = \frac{\dot{m}_v \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1)}{3,6} \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

kde je

P_k	tepelný výkon kotle [kW]
\dot{m}_v	hmotnostní průtok chladicí vody [kg/h] – viz vzorec (2)
c_w	střední měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě vody [MJ/kg.K]
t_1	teplota vody na vstupu do kotle [°C]
t_2	teplota vody na výstupu z kotle [°C]

Teploty jsou měřeny kalibrovanými odporovými teplotními čidly (Pt100).

Měření průtoku vody je prováděno pomocí kalibrovaného indukčního průtokoměru zabudovaného v měřicí smyčce, jehož výstup je napojen na čítač pulsů a naměřené hodnoty jsou zaznamenávány a vyhodnocovány příslušnou výpočetní technikou.

Přepočet objemového průtoku vody na hmotnostní průtok vody je proveden dle vztahu:

$$\dot{m}_v = \dot{V}_v \cdot \rho \quad [\text{kg/h}] \quad (2)$$

kde je

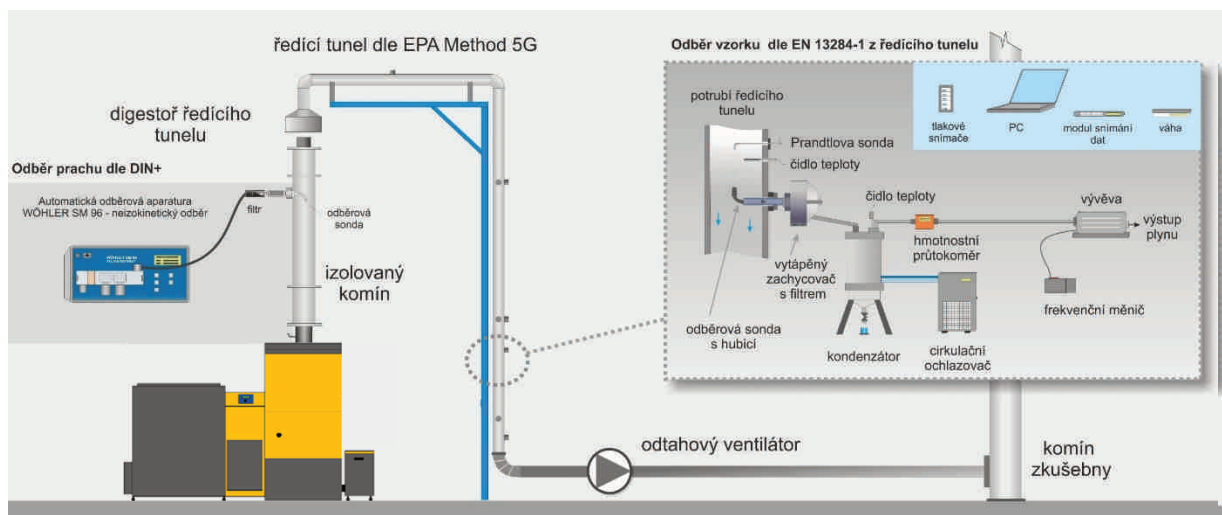
\dot{m}_v hmotnostní průtok chladicí vody [kg/h]

ρ hustota vody při teplotě na průtokoměru [kg/m³] (voda vstupující do kotle, potažmo kondenzační jednotky)

\dot{V}_v měřený průtok [m³/h]

Pro měření plyných emisí je použit analyzátor ABB – složky CO, CO₂ a NO_x jsou měřeny metodou pohlcování infračerveného záření, složka TOC (total organic carbon – celkový organický uhlík) je měřena plamenoionizačním detektorem FID (flame ionization detector) a složka O₂ je měřena paramagneticky [44]. Spaliny jsou odsávány v odběrném místě spalin ve výšce 1,5 m nad spalovacím zařízením – v tomto případě za kondenzační jednotkou. Analyzátory plyných emisí jsou před každým měřením kalibrovány kalibračními plyny pro ověření správnosti měření.

Tuhé znečišťující látky jsou měřeny aparaturou WOEHLER SM96, případně kontinuálním prachoměrem WOEHLER SM500 v odběrném místě spalin ve výšce 1,5 m nad spalovacím zařízením – v tomto případě za kondenzační jednotkou – viz Obr. 4. Měření tuhých znečišťujících látek je založeno na základě gravimetrického principu. Při měření aparaturou WOEHLER SM96 je prach odsáván sondou na filtr a je zaznamenáván objem odsávaných spalin. Veškeré filtry jsou před použitím vysušeny při 105 °C, stabilizovány v exsikátoru, zváženy a zaevidovány. Po expozici je filtr opět vysušen při 105 °C, stabilizován v exsikátoru a zvážen. Vyhodnocení je následně provedeno ve vztahu k odebranému objemu spalin a výsledek je přepočten na referenční hodnotu kyslíku, který je měřen ve stejném odběrném místě. Při měření kontinuálním prachoměrem WOEHLER SM500 je kontinuálně vážen filtr ve vyhřívané komoře. Aktuální koncentrace prachu vychází z rozdílu hmotnosti filtru za cyklus (běžně 1 s). Filtr je před měřením a po měření zvážen obdobně jako u aparatury WOEHLER SM96 pro ověření správnosti měření. WOEHLER SM500 navíc měří koncentraci CO₂ a odsávaný objem pro své vlastní přepočty. Koncentrace prachu je v případě současného měření s analyzátozem spalin přepočítávána na referenční O₂ [45].



Obr. 4 – Dva možné způsoby stanovení prachu (přímý odběr vzorku spalín – Woehler SM 96, Woehler SM 500 a odběr vzorku z ředícího tunelu [46], [47], [48], [49]

pozn.: Na obrázku je znázorněno spalovací zařízení napojené na izolovaný komín, který slouží jako měřicí trať dle [11]. Komín je zaústěn do digestoře ředícího tunelu dle [48],[49]. V měřícím bodě v izolovaném komínu jsou otvory pro zaústění sondy odběrové aparatury Woehler SM96 (případně Woehler SM 500) a sondy pro odběr plyných emisí analyzátoru ABB (případně SICK) – popsány výše. V izolovaném komínu probíhá měření neředěných spalín. V případě, že je koncentrace prachu příliš vysoká, teplota je příliš vysoká je možné odebrat emise tuhých znečišťujících látek (prachu) také z ředícího tunelu s tím, že je třeba v ředícím tunelu měřit hladinu O_2 nebo CO_2 , aby bylo možné vypočítat ředící poměr.

Teploty v jednotlivých částech kotle, kondenzační jednotky a spalínové cesty jsou měřeny termočlánky typu K, povrchové teploty zařízení jsou měřeny termočlánky typu T.

Veškeré použité měřicí zařízení je řádně kalibrováno.

Všechny výše uvedené měřené hodnoty jsou měřeny na zkušebně Výzkumného energetického centra (dále také VEC) na měřících smyčkách a analyzátorech spalín (Obr. 5). Kotel a kondenzační jednotka jsou měřeny odděleně pomocí dvou měřících smyček, aby bylo možné přesně kvantifikovat zisk energie na kondenzační jednotce. Pro tento případ bylo nutné modifikovat software pro načítání dat do programu Microsoft Excel, aby bylo možné do jednoho souboru načítat data ze dvou měřících smyček koordinovaně ve stejné časy. Díky tomu bylo docíleno koordinace všech měřených parametrů v minutových intervalech.



Obr. 5 – Automatický kotel na biomasu s kondenzační jednotkou připojený na měřicí smyčky a analyzátor spalín (foto: T. Chleboun)

pozn.: Na obrázku je patrný automatický kotel (žlutý) s nasypkou pro vlhkou štěpku (šedý) a dvoukomorová kondenzační jednotka s litinovým výměníkem (žlutá s průřazy). Kondenzační jednotka i kotel jsou napojeny na vlastní měřicí smyčky. Komín za kondenzační jednotkou je přes digestoř napojen na řídící tunel (modrá konstrukce). Vedle zásobníku paliva je pytel (big bag) s vlhkou štěpkou pro experimentální zkoušky.

Veškeré hodnoty jsou vyčítány do databáze (vnitřní software k měřicím smyčkám VEC) v sekundových intervalech. Dílčí výpočty a vyhodnocení jsou provedeny v softwaru Microsoft Excel 2007 z minutových průměrů, vyčítaných z výše zmíněné databáze.

Kotel byl připojen na měřicí smyčky a analyzátor spalín, jehož sonda byla umístěna v odvodu spalín za kondenzační jednotkou ve vzdálenosti 1,5 m od výstupu z kondenzační jednotky. Ve stejném měřicím bodě byl umístěn také termočlánek typu K, který měřil teplotu spalín za kondenzační jednotkou – tato teplota má vliv na komínovou ztrátu a na koncentraci spalín za kotlem (případně kondenzační jednotkou). Odvod spalín (komín) za kondenzační jednotkou je izolován a odpovídá normě pro měření spalovacích zařízení ČSN EN 303-5 [11]. Tento komín je zaústěn do digestoře ředícího tunelu [48], který technicky vychází z americké normy US EPA METHOD 5g – PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel [49]. Tento ředící tunel má více funkcí. Jeho nespornou výhodou je především přesné řízení tahu ve spalínové cestě za kotlem. To je docíleno stanovením většího ředícího poměru, díky němuž je zároveň se spalínami přisáváno velké množství vzduchu a regulační interval tahu v komínu je tak menší. Ředění spalín se využívá také k měření koncentrací emisí tuhých znečišťujících látek – především potom malých částic PM₁₀, PM_{2,5} a menších, u kterých je třeba zajistit nižší teplotu

spalin pro přesnější měření. Ředící tunel zajistí ředění na požadovaný ředící poměr a tím zajistí také nižší teplotu ředěných spalin. Pro výpočet skutečného ředícího poměru je třeba v ředícím tunelu měřit také koncentraci kyslíku O_2 nebo oxidu uhličitého CO_2 .

Kondenzát odebraný z přepadu kondenzační jednotky byl podroben analýze ve Zdravotním ústavu se sídlem v Ostravě. Žádané parametry kondenzátu jsou především polyaromatické uhlovodíky (dále také PAU), nerozpuštěné látky, fenoly a pH (kyselost kondenzátu). Tyto hodnoty je třeba srovnat s požadavky na vody, vypouštěné do jednotné kanalizace. Pro porovnání jsou použity požadované hodnoty severomoravských vodovodů a kanalizací Ostrava a. s. (dále také SmVaK).

Vlhkost paliva je získána pomocí analyzátoru vlhkosti Mettler Toledo HR 73 s platnou kalibrací. Tento přístroj je založen na vážení vzorku přesnou váhou při vysušování při $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při stanovení vlhkosti paliva je postupováno v souladu s návodem k přístroji – doba ohřevu vzorku je minimálně 2,5 h.

Veškeré parametry paliva jsou zjišťovány laboratorním rozbořem v příslušné laboratoři paliv a výsledkem je prvkový rozbor paliva včetně laboratorně zjištěné hodnoty vlhkosti paliva. Tyto hodnoty jsou následně přepočítány na aktuální vlhkost paliva v době spalovací zkoušky – viz vzorec 13, 14, 15.

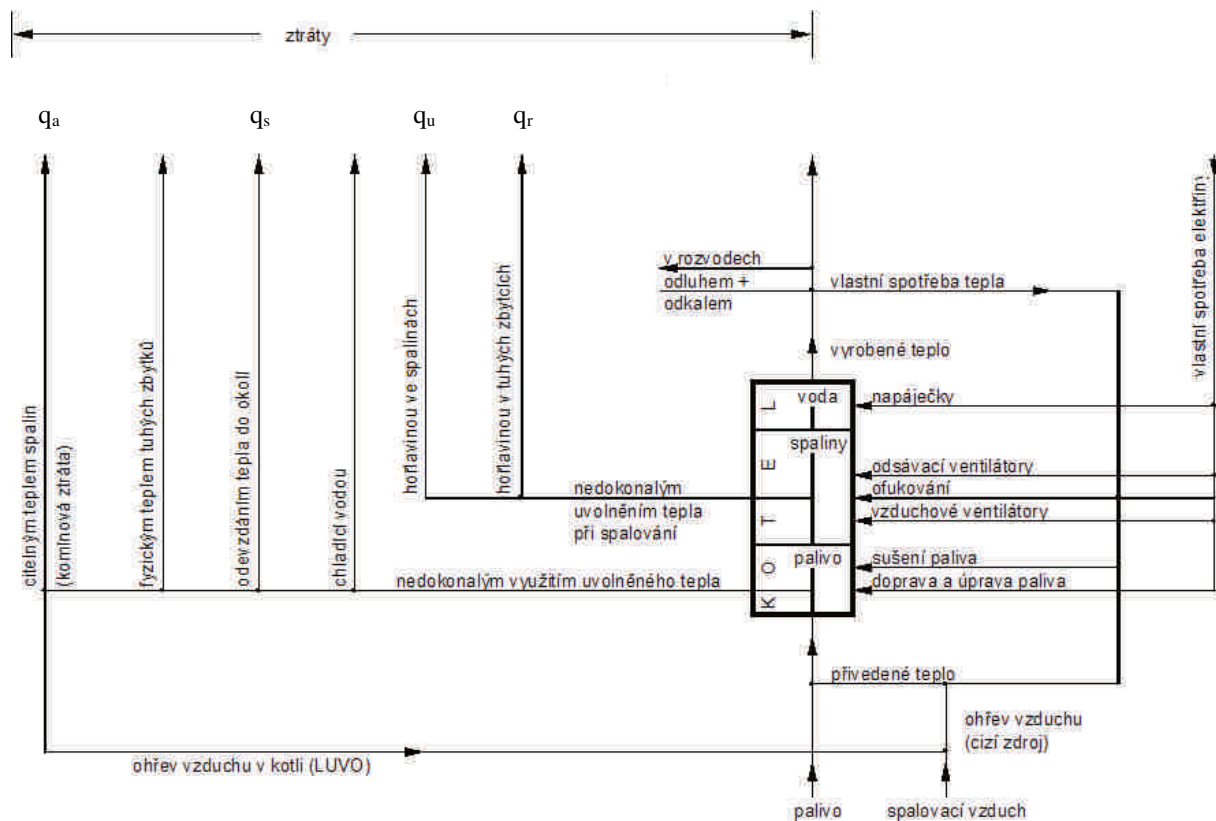
5.2 Výpočtové metody

Výpočtové metody vycházejí ze základních principů spalování a jsou rozděleny takto:

- Výpočet účinnosti nepřímou metodou
- Výpočet účinnosti přímou metodou
- Další podpůrné výpočty

Účinnost kotle s kondenzační jednotkou je možné zjistit pomocí přímé nebo nepřímé metody pro stanovení účinnosti [50]. Zatímco přímá metoda vychází z rozdílu mezi energií dodanou v palivu a energií předanou do otopné soustavy, nepřímá metoda vychází z energetické bilance kotle (Obr. 6). Nepřímá účinnost je při vývoji zařízení mnohem užitečnější, protože umožňuje stanovovat jednotlivé dílčí ztráty kotle a optimalizovat je [50].

Vzhledem k velikosti testovaného kotle nebylo možné zajistit, aby byl kotel umístěn na tenzometrické váze a tím kontinuálně měřena spotřeba paliva.



Obr. 6 – Energetická bilance kotle [50].

pozn.: Na obrázku je zobrazeno schéma energetických vstupů a výstupů ze spalovacího procesu. Vstupy jsou tvořeny palivem, spalovacím vzduchem a vlastní spotřebou elektrické energie. Výstupem je vyrobené teplo, předané do rozvodů ústředního vytápění. Rozdíl mezi těmito vstupy a výstupem je tvořen různými druhy ztrát v procesu, které souhrnně snižují účinnost kotle.

Účinnost kotle stanovená přímou metodou je poměr vyrobeného tepelného výkonu a tepelného příkonu [42]:

$$\eta_k = \frac{P_k}{P_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

$$P_p = \frac{\dot{m}_{\text{pal}} \cdot Q_i^{\text{rL}}}{3,6} \quad [\text{kW}] \quad (4)$$

$$\dot{m}_{\text{pal}} = \frac{\Delta m}{\tau} \quad [\text{kg/h}] \quad (5)$$

$$\Delta m = m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}} \quad [\text{kg}] \quad (6)$$

kde je

η_k účinnost kotle [%]

P_k tepelný výkon kotle [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

P_P	tepelný příkon kotle [kW]
\dot{m}_{pal}	hmotnostní tok paliva [kg/h]
Q_i^{rL}	výhřevnost zkušební paliva dle rozboru [MJ/kg]
Δm	hmotnostní úbytek paliva [kg]
τ	doba trvání měření úbytku paliva [h]
$m_{\text{poč}}$	naměřená hmotnost kotle na začátku měření [kg]
m_{kon}	naměřená hmotnost kotle na konci měření [kg] po vysypání popele z popelníku

Stanovení účinnosti nepřímou metodou vychází z úvahy, že teoretická účinnost ideálního stroje (100 %) je u reálného zařízení (kotle) snížena o jednotlivé ztráty - viz vztah (7) [50].

$$\eta_k = 100 - (q_a + q_u + q_r + q_s) \quad [\%] \quad (7)$$

kde je

η_k	účinnost kotle [%]
q_a	poměrná ztráta citelným teplem spalín ve vztahu k výhřevnosti zkušební paliva [%]
q_u	poměrná ztráta plynným nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušební paliva [%]
q_r	poměrná ztráta mechanickým nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušební paliva [%]
q_s	poměrná ztráta sdílením tepla do okolí ve vztahu k výhřevnosti zkušební paliva [%]

Nejvýznamnější složkou je při standardním provozu ztráta citelným teplem spalín – tzv. komínová ztráta. Komínovou ztrátu u běžného kotle lze formulovat pomocí vzorců dle [42]:

$$q_a = \frac{(V_{\text{atr}} \cdot c_{\text{pmatr}} + V_w \cdot c_{\text{pmH}_2\text{O}}) \cdot (t_a - t_L)}{Q_i^{\text{rL}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$(8) \quad V_{\text{atr}} = \frac{1,85 \cdot C^r + 0,68 \cdot S^r}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

$$(9)$$

$$c_{\text{pmatr}} = \left[0,36 + 0,008 \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 + \left[0,085 + 0,19 \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,14 \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\text{CO}_2}{100} \right) + \left[0,3 \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,2 \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\text{CO}_2}{100} \right)^2 \right] \cdot 3,6 \quad [\text{MJ/K} \cdot \text{m}_N^3] \quad (10)$$

$$c_{\text{pmH}_2\text{O}} = \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \cdot 3,6 \quad [\text{MJ/K} \cdot \text{m}_N^3] \quad (11)$$

$$V_w = 11,1 \cdot H_2^r + 1,24 \cdot W_t^r \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (12)$$

kde je

V_{atr}	objem skutečně vzniklých suchých spalín [m_N^3/kg]
V_w	objem vodní páry ve spalínách [m_N^3/kg]
CO	objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalínách [% obj.]
SO ₂	objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalínách [% obj.]
CO ₂	objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách [% obj.]
t_a	teplota spalín [$^{\circ}\text{C}$]
C^r	hmotnostní podíl uhlíku ve zkušebním palivu dle rozboru [% hm.]
S^r	hmotnostní podíl síry ve zkušebním palivu dle rozboru [% hm.]
H_2^r	hmotnostní podíl vodíku ve zkušebním palivu [1]
W_t^r	hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný pomocí analyzátoru vlhkosti [1]
c_{pmatr}	střední měrná tepelná kapacita suchých spalín při normálních podmínkách v závislosti na teplotě a složení spalín [$\text{MJ}/(\text{K} \cdot \text{m}_N^3)$]
$c_{\text{pmH}_2\text{O}}$	střední měrná tepelná kapacita vodní páry při normálních podmínkách v závislosti na teplotě [$\text{MJ}/(\text{K} \cdot \text{m}_N^3)$]
Q_i^{rL}	výhřevnost zkušebního paliva dle rozboru [MJ/kg]

Komínová ztráta lze určit i dalšími zjednodušujícími metodami – např. dle Siegerta (pomocí CO₂), dle rakouských norem ÖNORM 7510 (pomocí O₂), dle teploty spalín a obsahu kyslíku ve spalínách atd. viz [50].

Tímto postupem je možné vypočítat nepřímou účinnost samotného kotle ve vztahu k výhřevnosti paliva. Pro zohlednění kondenzační jednotky je třeba vypočtenou účinnost

navýšit o zisk, který plyne z kondenzace vodní páry ve spalínách za kotlem. Vzorec pro toto zohlednění není v normě uveden a je třeba ho upravit na základě znalosti funkce kondenzační jednotky. Jednou z možností je definovat množství citelného tepla ve spalínách za kotlem a odečíst od ní teplo předané v kondenzačním výměníku do otopného media a ztrátu sdílením tepla do okolí pláštěm kondenzační jednotky.

Vlastnosti paliva jsou na základě laboratorně zjištěných hodnot přepočítány dle aktuální vlhkosti paliva při spalování. Přepočet základních parametrů paliva (prvkový rozbor paliva) je prováděn dle vzorce [42]:

$$X^r = X^{rL} \cdot \frac{1 - W_t^r}{1 - W_t^{rL}} \quad [1] \quad (13)$$

kde je

X^r hmotnostní podíl daného prvku v palivu [1]

X^{rL} hmotnostní podíl daného prvku v palivu zjištěný laboratoří [1]

W_t^r hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný pomocí analyzátoru vlhkosti [1]

W_t^{rL} hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný laboratoří [1]

Výhřevnost paliva je přepočtena dle vzorce:

$$Q_i^r = \left[Q_i^{rL} + 2,4535 \cdot (W_t^{rL} + 9 \cdot H_2^{rL}) \right] \cdot \frac{1 - W_t^r - A^r}{1 - W_t^{rL} - A^{rL}} - 2,4535 \cdot (W_t^r + 9 \cdot H_2^r) \quad [\text{MJ/kg}] \quad (14)$$

nebo dle vzorce:

$$Q_i^r = (Q_i^{rL} + 2,4535 \cdot W_t^{rL}) \cdot \frac{1 - W_t^r}{1 - W_t^{rL}} - 2,4535 \cdot W_t^r \quad [\text{MJ/kg}] \quad (15)$$

kde je

Q_i^r výhřevnost zkušební paliva [MJ/kg]

Q_i^{rL} výhřevnost zkušební paliva dle rozboru [MJ/kg]

A^r hmotnostní podíl popele v palivu získaný pomocí vzorce 13 [1]

A^{rL} hmotnostní podíl popele v palivu zjištěný laboratoří [1]

H_2^r hmotnostní podíl vodíku v palivu získaný pomocí vzorce 13 [1]

H_2^{rL} hmotnostní podíl vodíku v palivu zjištěný laboratoří [1]

W_t^r hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný pomocí analyzátoru vlhkosti [1]

W_t^{rL} hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný laboratoří [1]

Na základě změřeného výkonu kotle a kondenzační jednotky, resp. teplot na vstupu a výstup a průtoků s přepočtem dle (1), a vypočtené nepřímé účinnosti samotného kotle dle (7) je možné vypočítat celkovou účinnost ve vztahu k výhřevnosti paliva takto (normovaný stupeň využití):

$$\eta_{\text{sestavy}} = \frac{(P_k + P_{\text{kondenzace}}) \cdot \eta_k}{P_k} \quad [\%] \quad (16)$$

kde je

η_{sestavy} účinnost sestavy kotle a kondenzační jednotky (normovaný stupeň využití [%])

η_k účinnost kotle [%] dle nepřímé metody podle výhřevnosti

P_k tepelný výkon kotle [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

$P_{\text{kondenzace}}$ tepelný výkon kondenzační jednotky [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

Druhou možností, jak využít znalosti nepřímé účinnosti kotle je výpočet množství vody ve spalínách a na základě množství kondenzátu zjistit energetický přínos kondenzační jednotky. Tento postup umožní ověřit správnost výpočtu účinnosti dle předchozí metody. Navíc tento postup umožní zjistit stupeň kondenzace a zvážit případné dopady na účinnost v případě zvýšení stupně kondenzace k teoretickým úrovním.

Stupeň kondenzace je možné určit tak, že z vlhkosti paliva a spotřeby paliva zjistíme množství vody, které vstupuje do spalovací komory. Pokud k tomuto množství připočteme také množství vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku, získáme celkové množství vody, která by teoreticky mohla kondenzovat na výměníku kondenzační jednotky. Porovnáním této hodnoty s naměřeným množstvím kondenzátu je možné určit stupeň kondenzace.

$$\eta_{\text{kondenzace}} = \frac{\dot{m}_{\text{kondenzace}}}{(\dot{m}_{\text{palivo}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}})} \quad [\%] \quad (17)$$

kde je

$\eta_{\text{kondenzace}}$ stupeň kondenzace (účinnost kondenzace) [%]

$\dot{m}_{\text{kondenzace}}$ hmotnostní tok kondenzátu odebraného za 1 hodinu provozu [kg/h]

\dot{m}_{palivo} hmotnostní tok vody obsažené v palivu spotřebovaném za 1 hodinu provozu [kg/h] – zjistíme dle vzorce (18)

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ hmotnostní tok vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku ve spalovací komoře [kg/h] – zjistíme dle vzorce (21)

Hmotnostní toky vody obsažené v palivu a vody, která se uvolní přeměnou vodíku a kyslíku se dají zjistit tímto způsobem:

$$\dot{m}_{\text{palivo}} = \frac{\frac{P_k}{\eta_k}}{\frac{Q_i^f}{3,6}} \cdot W_t^r \quad [\text{kg}] \quad (18)$$

kde je

\dot{m}_{palivo} hmotnostní tok vody obsažené v palivu spotřebovaném za 1 hodinu provozu [kg/h]

P_k tepelný výkon kotle [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

η_k účinnost kotle [%]

Q_i^f výhřevnost zkušební paliva [MJ/kg]

W_t^r hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný pomocí analyzátoru vlhkosti [1]

Další složkou, díky které se ze spalovacího procesu uvolňuje voda je vodík (H_2). Díky prvkovému rozboru je sice známo množství vodíku v palivu (% hm.), ale je třeba zjistit, kolik vody se uvolní při spálení určitého množství paliva. K tomu je třeba výpočet pomocí molárních hmotností prvků (vodíku a kyslíku).

$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g/mol}$;

$M(\text{H}_2) = 2,01 \text{ g/mol}$;

V 1 molu vody (H_2O) je tedy 2,01 g vodíku (H_2). Z jednoho kilogramu vodíku se tedy uvolní toto množství vody:

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m}{M} = \frac{1000}{2,01} = 497,5 \text{ mol} \quad (19)$$

Množství 497,5 mol vodíku (H_2) má hmotnost 1000g a je obsaženo ve stejném látkovém množství vody:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = n \cdot M = 497,5 \cdot 18 = 8955,22 \text{ g} = 8,95 \text{ kg} \quad (20)$$

Výsledný hmotnostní tok vody z přeměny vodíku a kyslíku je tedy možno vypočítat dle vzorce (21):

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{P_k}{\eta_k}}{\frac{Q_i^r}{3,6}} \cdot H_2^r \cdot 8,95 \quad [\text{kg}] \quad (21)$$

kde je

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ hmotnostní tok vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku ve spalovací komoře [kg/h]

P_k tepelný výkon kotle [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

η_k účinnost kotle [%]

Q_i^r výhřevnost zkušebního paliva [MJ/kg]

H_2^r hmotnostní podíl vodíku v palivu přepočtený na vlhkost při spalování paliva [1]

Na základě teoretického množství kondenzátu můžeme odvodit také teoretický výkon kondenzační jednotky v případě možnosti, že veškerá voda odcházející se spalinami zkondenzuje v kondenzační jednotce a skupenské teplo předá teplotonosné látce. Předpokládáme-li, že v kondenzační jednotce zkondenzuje veškerá voda, obsažená ve spalinách, potom předané teplo se bude rovnat násobku množství vody ve spalinách a měrného skupenského tepla kondenzace vody. Celková uvolněná energie lze vypočítat podle vzorce (22):

$$P_{\text{kondenzace, teor.}} = \frac{(m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{palivo}}) \cdot l}{3,6} \quad [\text{kW}] \quad (22)$$

kde je

$P_{\text{kondenzace, teor.}}$ teoretický tepelný výkon kondenzační jednotky [kW]

m_{palivo} hmotnostní tok vody obsažené v palivu spotřebovaném za 1 hodinu provozu [kg/h] – zjistíme dle vzorce (18)

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ hmotnostní tok vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku ve spalovací komoře [kg/h] – zjistíme dle vzorce (21)

l měrné skupenské teplo kondenzace vody = měrné skupenské teplo varu vody = přibližně 2,26 - 2,5 MJ/kg (závisí na teplotě)

Vzhledem k požadavkům směrnice 2009/125/ES na ekodesign [39] a potřebám lepšího pochopení problematiky je třeba také určit skutečnou účinnost, vycházející ze spalného tepla. Na základě znalosti hmotnostního toku paliva a spalného tepla je možné tuto účinnost určit. Vzhledem k nemožnosti měřit hmotnostní tok paliva váhou je nutné zjistit hmotnostní tok paliva přepočtem z měřené nepřímé účinnosti kotle jako v předchozím případě celkové relativní účinnosti. Přepočet mezi spalným teplem a výhřevností je dán vztahem dle vzorce (23) [14]:

$$Q_n^r = Q_i^r + 2,45 \cdot (W_t^r + 9 \cdot H_2^r) \quad [\text{MJ/kg}] \quad (23)$$

kde je

Q_n^r spalné teplo zkušebního paliva [MJ/kg]

Q_i^r výhřevnost zkušebního paliva [MJ/kg]

W_t^r hmotnostní podíl celkové vody v palivu zjištěný pomocí analyzátoru vlhkosti [1]

H_2^r hmotnostní podíl vodíku v palivu získaný pomocí vzorce 13 [1]

Na základě znalosti spalného tepla je možné vypočítat celkovou účinnost zařízení ve vztahu k spalnému teple. Účinnost sestavy ve vztahu ke spalnému teple je odvozena – viz vzorec 24.

$$\eta_{\text{sestavy, spal.}} = \frac{(P_k + P_{\text{kondenzace}}) \cdot \eta_k \cdot Q_i^r}{P_k \cdot Q_n^r} \quad [\%] \quad (24)$$

kde je

$\eta_{\text{sestavy, spal.}}$ účinnost sestavy kotle a kondenzační jednotky (ve vztahu ke spalnému teple) [%]

η_k účinnost kotle [%] dle nepřímé metody podle výhřevnosti

P_k tepelný výkon kotle [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

$P_{\text{kondenzace}}$ tepelný výkon kondenzační jednotky [kW], stanovuje se dle vzorce (1)

Q_n^r spalné teplo zkušebního paliva [MJ/kg]

Q_i^r výhřevnost zkušebního paliva [MJ/kg]

5.3 Praktické ověřovací metody

Při vývoji automatického kotle na vlhkou biomasu bylo k optimalizaci přistupováno pomocí praktických experimentálních zkoušek. Jelikož nebylo možné provozovat výše zmíněný automatický kotel dlouhodobě, byl sestaven plán měření, který zahrnoval různé varianty použití jak z hlediska využívání vyrobeného tepla, tak z hlediska použitého paliva. Pro tyto stavy

a varianty byly poté optimalizovány jednotlivé součásti kotle, aby bylo dosaženo co nejlepších výkonů a účinnosti při co nejnižším vývinu emisí znečišťujících látek. Nejspolehlivější cestou pro získání výsledků a zkušeností bylo opakování experimentálních měření.

Praktickými měřeními a analýzou výsledků jsou získány zkušenosti a poznatky z oblasti spalování méně hodnotných paliv. Induktivním procesem ze získaných dílčích rozborů jsou vyvozeny obecné závěry, které mají platnost přesahující rámec této práce.

Mezi praktické ověřovací metody patří dle autora rovněž obrazová analýza videozáznamů z provozu kotle, neboť poskytuje důležité informace o funkci jednotlivých součástí. Záznamy vysokorychlostních kamer umožňují lépe pochopit problémy spojené s dopravou paliva v zásobníku paliva, či s dopravou paliva na hořák v průběhu spalování.

6 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ VYTÁPĚNÍ TUHÝMI PALIVY

Dle posledního sčítání lidu v roce 2011 vyplývá, že nejčastějším palivem pro vytápění domácností v České republice je zemní plyn (38,8 %) [51]. Tento systém získal nejvíce na oblibě díky masové podpoře plynofikace v polovině minulého desetiletí a díky tomu dnes ve většině samostatných rodinných domů zaujímá největší podíl ze všech systémů.

Druhým nejčastějším zdrojem tepla pro domácnosti je zásobování teplem ze středních a velkých zdrojů – rozšířené především u bytové výstavby [51]. Výhodou je především to, že pomáhá využívat teplo z městských elektráren a tím zvýšit exergické využití energie paliva.

Přibližně stejně jsou podílově zastoupeny systémy vytápění elektřinou (včetně tepelných čerpadel), palivy na bázi dřeva a fosilními palivy (černé a hnědé uhlí, antracit, koks) [51].

Vytápění na tuhá paliva bylo užíváno hojně v minulosti, avšak v dnešní době získává znovu na oblibě. V minulosti byly instalovány spalovací zařízení především na hnědé a černé uhlí. Tyto zdroje byly převážně větších výkonů (většinou 50 kW a více) a měly účinnost přibližně 50 %. Lidé tyto zdroje často využívali i ke spalování paliv nebo odpadů, které podstatně zvyšovaly produkci emisí (jak plyných, tak tuhých znečišťujících látek) – například proplásky, uhelné kaly, lignit nebo hruboprach – energetické hnědé uhlí. Tato paliva jsou již relativně dlouho zakázána pro užívání ve zdrojích malých výkonů a další zpřísnění požadavků přichází s novým zákonem č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12], který zavádí termíny omezování některých typů zařízení a případné sankce za nedodržení požadavků normy ČSN EN 303-5:2013 [11].

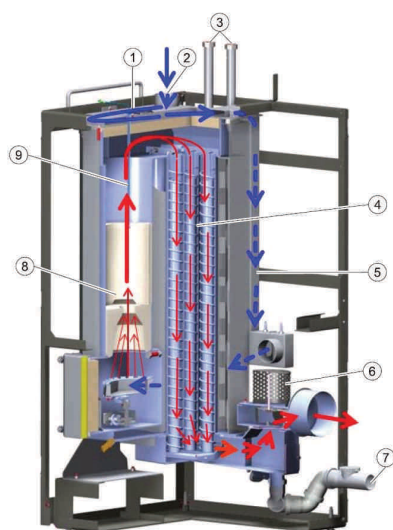
Jen minimum domácností využívá vytápění lehkými a extralehkými topnými oleji, směsí propanu a butanu a dalšími úzkoprofilovými palivy [51], která jsou využívána v místech, kde nelze použít standardní paliva z důvodu dostupnosti paliva nebo sítě.

V převážné většině bytového fondu v České republice je v současnosti instalován systém ústředního vytápění. Jelikož je většina bytového fondu situována v městských aglomeracích, jsou tyto objekty často vytápěny centrálním zásobováním teplem. Tento systém zaručuje stabilní dodávku a zvyšuje exergické využití energie paliva a tím potažmo efektivitu elektráren/tepláren. V globálním měřítku jde o ekonomicky i ekologicky výhodný stav. V případě hromadného odpojování by totiž vzniklo množství nových zdrojů znečištění (REZZO 3 – registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší, 3 – malé stacionární zdroje znečišťování) a síť teplovodů a horkovodů by postrádala smyslu. Dalším důsledkem by bylo zvýšení cen elektrické energie z důvodu nižší celkové účinnosti výroby elektrické energie.

Bytový fond mimo centra měst (v satelitních obcích a na vesnicích) je převážně vytápěn dnes již zastaralými zdroji na tuhá paliva (především prohořivací a odhořivací kotle na černé a hnědé uhlí, antracit a koks) nebo lokálními výtopnami. Tím tyto bytové domy přispívají ke znečištění ovzduší v obcích a provoz těchto zařízení je mnohdy zátěží pro nájemníky, neboť je třeba periodicky přikládat palivo a vybírat popel. S větším vývinem emisí se pojí také nižší účinnost těchto zařízení, což je způsobeno především nedokonalým spálením všech hořlavých složek paliva. Nekvalitní spalování je u těchto zařízení způsobeno především nedostatečnými možnostmi regulace a omezenými odbornými znalostmi obsluhy.

Z těchto důvodů je dnes nejčastějším řešením náhrada za plynový kotel, kaskádu plynových kotlů nebo v poslední době stále častější řešení s využitím tepelných čerpadel různých typů (z důvodu zjednodušení nejčastěji v systému vzduch-voda). Stále častěji se uplatňují také kotle na biomasu – především dřevní peletky a štěpku (např. obecní výtopna v obci Hoštětín, spalující dřevní štěpku) [52]. V konkrétních aplikacích je možné také najít kotle na jiná různorodá alternativní paliva – např. pohankový šrot (Pohankový mlýn Šmajstrla s r. o., Frenštát pod Radhoštěm) nebo kotle s možností spalovat odpad z dřevovýroby (Jelínek - výroba nábytku s r. o. a další) [53].

Kotel na biomasu využívající principu kondenzace vodní páry ve spalínách v současnosti neexistuje v provedení jako malý zdroj do 500 kW dle [12]. Výjimkou jsou inovativní kotle Ökofen Pellematic Condens, které spalují čisté dřevní pelety. Schéma funkce kondenzačního kotle na pelety s popisem je znázorněno na Obr. 7.



1	Vzduchem chlazený kryt kotle
2	Sání spalovacího vzduchu
3	Výstup topné vody / vstup vratné vody
4	Kondenzační výměník s čistícím zařízením (mechanické / vodní)
5	Přívod spalovacího vzduchu
6	Spalinový ventilátor
7	Odvod kondenzátu
8	Sekundární spalovací prostor
9	Sonda spalování

Obr. 7 – Schéma kotle Ökofen Pellematic Condens s popisem [54]

Tento kotel dosahuje ve své nejvýkonnější konfiguraci relativní účinnosti při jmenovitém výkonu až 107,3 %, což je mezi malými zdroji na tuhá paliva dosud nejpříznivější hodnotou.

Kondenzační výměníky se v současnosti testují také pro svou schopnost odlučovat aerosoly [55]. Právě tato vlastnost se může projevit jako zásadní pro snížení emisí tuhých znečišťujících látek (prach) ve spalínách.

Využití kondenzace vodní páry ze spalin při spalování vlhké biomasy v současnosti probíhá jen ve velkých zdrojích dle [12] (např. v minulosti v rámci ekonomizace provozu experimentálně fungoval kondenzační výměník v podniku BIOCEL Paskov a. s.). Jedná se tedy o zcela nové řešení pro bytové domy a jiné menší objekty, které jsou vytápěny malými zdroji tepla dle [12].

Další možností zvýšení celkové účinnosti spalovacích zařízení je jejich propojení s generátorem elektrické energie. Tyto malé kogenerační jednotky obvykle využívají stirlingův motor (v případě plynových zařízení také klasický spalovací motor nebo turbínu). V současnosti je možné se setkat s kotlem Ökofen Pellematic Smart E [54], který v sobě zahrnuje také stirlingův motor, schopný část vyrobeného tepla převést na elektrickou energii. Ve fázi vývoje (prototyp) bylo možné se také setkat s kotli od firmy Hoval [56] nebo Sunmachine GmbH [57].

6.1 Poruchy a problémy stávajících kotlů

Zdroje na pevná paliva jsou považovány za velmi spolehlivé zdroje tepla, které jsou technicky jednoduché, a s určitou mírou nadsázky můžeme říci, že tyto zdroje dokážou fungovat i v případě výpadku zásobování elektrickou energií (bez elektrické energie se dnes neobejde žádný systém kromě starších samotížných, ale je možné dočasně zajistit provoz pomocí záložního zdroje). S příchodem zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12], který upravuje prodej a provoz spalovacích zařízení na pevná paliva, se dostávají do popředí technicky vyspělejší zdroje tepla na pevná paliva, jako jsou kotle pyrolytické (zplyňovací) nebo automatické.

Nejčastějším problémem u zdrojů na pevná paliva je jejich předimenzování a špatná regulovatelnost. To bývá velmi často zapříčiněno absencí akumulární nádoby, která jednak vyrovnává rozdíly mezi výkonem zdroje a potřebou objektu, ale také pomáhá překlenout otopné přestávky. Otopné přestávky byly v minulosti převážně důsledkem potřeby lidské obsluhy. V dnešní době se otopné přestávky využívají především v budovách občanské vybavenosti pro úsporu nákladu na vytápění a jsou spojeny s promyšlenou regulací. Menší zdroje v domácnostech jsou většinou regulovány nadřazenou regulací a jsou neustále v provozu, byť modulují na snížený výkon.

V případě předimenzování automatického zdroje se systém chová tak, že jakmile je dosažena horní mez regulované veličiny, zdroj sníží výkon, případně se odstaví úplně. V případě kotlů s ruční obsluhou (prohořivací, odhořivací a pyrolytické) není tak snadné kotel odstavit. Musí nejprve dohořet palivo v topeništi. Z tohoto důvodu musí mít systém větší objem vody a vhodně navržené bezpečnostní armatury, které zajistí bezproblémový odvod přebytečného tepla mimo výměník kotle. U krbových vložek a krbových kamen s výměníkem je dnes hojně používaným řešením tzv. chladicí smyčka, která je napojena na přívod studené vody z vodovodního řadu, která dokáže ochladit výměník kamen v případě potřeby.

Mnohé starší kotle jsou regulovatelné pouze ruční uzavíráním přívodu primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. To má za následek sice snížení výkonu, ale podstatné zvýšení emisí CO, SO₂, NO_x, TOC a TZL (tuhé znečišťující látky – prach). Největší vliv na zvýšení koncentrace TZL ve spalinách a tím i zvýšenou tmavost kouře má uzavření přívodu sekundárního spalovacího vzduchu, který umožňuje dohoření nespálených plynů a tuhých znečišťujících látek (prachu) na odtahu do komína. I když se jedná o relativně účinnou a u těchto zdrojů prakticky jedinou regulaci, ne vždy tato regulace pracuje správně. Pokud má tato regulace správně fungovat, je třeba, aby byl kotel vzduchotěsný a uzavření všech přívodů dokázalo plamen udusit. V případě, kdy po uzavření všech otvorů k udušení nedojde, je kotlové těleso netěsné a regulace neúčinná. Nejčastější příčinou této závady bývá již opotřebovaná azbestová těsnicí šňůra ve dvířkách do topeniště či spalovací komory. V mnoha případech pouhá výměna těsnicí šňůry může vést nejen k bezchybné funkci, ale také k výrazným úsporám na palivu.

V každém případě je vhodné zdroje na pevná paliva doplnit akumulací nádobou, která zajistí delší dobu bez zásahu do spalování.

U těchto starších zdrojů tepla je také častou poruchou nízkoteplotní koroze, která je způsobena nedostatečnou teplotou vratné vody při vstupu do kotlového tělesa. Díky teplotě nižší než 60 °C je kotlový výměník výrazně chladnější než stěny topeniště a dochází ke kondenzaci vodní páry ze spalin na povrchu kotlového výměníku. To má za následek korozi, která je problematická především u ocelových kotlů. Kotle s litinovým tělesem jsou proti nízkoteplotní korozi výrazně odolnější. Proti nižší teplotě na vratném potrubí je možné se bránit pomocí směšovacího třicestného ventilu nebo pomocí jiného systému (např. Laddomat apod. [58]), který je založen na směšování teplot pomocí oběhového čerpadla nebo termostatického ventilu.

U starších odhořivacích a prohořivacích kotlů je problémem časté zadehtování spalinovodu, které je nutno jednou denně čistit. To má samozřejmě vliv na tah a emise výše zmíněných látek.

Dehtování je v převážné většině způsobeno spalováním nevyhovujícího paliva – nejčastěji mokrého dřeva nebo odpadů z domácnosti.

U spalovacích zařízení na pevná paliva ovlivňují kvalitu spalování čtyři vlivy [59]:

- 1 – O jaký jde zdroj (prohořivací, odhořivací, zplyňovací nebo automatické kotle, jejich účinnost)
- 2 – Co v tomto zdroji spalujeme (jaký je podíl hořlaviny a balastních složek paliva, především je důležitá vlhkost paliva; granulometrie paliva)
- 3 – Jak je zařízení udržováno (čištění teplosměnných ploch, spalinových cest, odstraňování popele)
- 4 – Znalost obsluhy (jestli obsluhuje zařízení osoba s dostatečnou obeznameností)

Právě kvalita obsluhy se na procesu spalování v topeništi projevuje největší měrou.

I při ideálně nastavených podmínkách (body 1 – 3) může obsluha nevhodným přikládáním nebo nastavením primárních, sekundárních a někdy i terciálních přívodů vzduchu do topeniště negativně ovlivnit výkon, účinnost a především emise. Při větším množství paliva nebo sníženém přívodu spalovacího vzduchu dochází k nedokonalému spalování, které se projevuje nadměrnou tvorbou CO, polycyklických aromatických uhlovodíků a sazí. Z tohoto důvodu se nyní výrobci snaží minimalizovat vliv obsluhy na spalovací proces [59].

Je-li zapotřebí zvýšit účinnost nebo snížit komplikovanost obsluhy, je možné nechat kotel na pevná paliva přestavět na modernější automatický kotel. Na trhu je již velké množství přestavbových sad pro různé typy prohořivacích kotlů. Tato přestavba tkví v tom, že stávající prohořivací kotel poskytne spalovací komoru s vodním výměníkem a do boku spalovací komory se vyřízne otvor a přes přírubu se do této spalovací komory vloží hořák se šnekovým podavačem paliva a další nutné příslušenství. Vlastnosti takového kotle jsou potom obdobné jako u originálně vyrobeného automatického kotle na tuhá paliva. Podobné přestavbové sady existují i s plynovými hořáky.

6.2 Poruchy stávajících rozvodů ústředního vytápění

V některých případech dochází ke zvyšování tlakových ztrát potrubí v systému. Jednou z příčin může být zvyšování odporu v potrubí buď zhoršením hydrodynamických parametrů (hladkost potrubí). Nejčastějšími příčinami tohoto stavu je buďto inkrustace (usazeniny na vnitřním povrchu potrubí) nebo koroze.

Inkrustace potrubí je způsobena fyzikálními vlastnostmi vody, která působí jako medium pro přenos tepla. Vliv má především tvrdost (obsah minerálních látek). V případě zavzdušnění systému nebo vniku cizího tělesa je inkrustace výrazně urychlena. U menších průměrů potrubí není prakticky možné se inkrustace zbavit a je třeba tyto části potrubí vyměnit. U větších průměrů od DN50 se využívá rotačního čištění vnitřních stěn potrubí. Jde o relativně nákladné řešení, proto je vhodná především v nepřístupných místech, kde by výměna potrubí byla ekonomicky nevýhodná.

Kromě inkrustace se na zvýšení tření uvnitř potrubí podílí také koroze. Koroze, tak jak ji známe z jiných aplikací je způsobena reakcí kyslíku v oběhové vodě tepelné soustavy. Ten se do soustavy dostává buď difuzí, nebo doplňovací vodou. Pokud je celkově malý úbytek oběhové vody, nebo je v soustavě málo porézních materiálů (difuzních míst), je většinou průběh koroze pomalý a nehrozí výrazné zvýšení tření v potrubí. V opačném případě při dlouhodobé intenzivní korozi hrozí i snížení tloušťky materiálu potrubí a možná perforace.

Dalším typem koroze v potrubí je elektrolytická koroze vzniklá chemickou reakcí mezi měděnou částí potrubí a pozinkovanou částí potrubí. Ačkoliv se při takovéto instalaci umísťuje mosazná přechodka, aby bylo zabráněno přímému styku těchto materiálů, dochází k uvolňování iontů mědi a tyto v pozinkované nebo ocelové části potrubí způsobují elektrolytickou korozi. Tato reakce může probíhat také mezi jinými kovy, které mají různý poměrný elektrolytický potenciál (kovy z opačné stupnice poměrného elektrolytického potenciálu). Z tohoto důvodu je třeba důsledně dodržovat některé zásady návrhu trubních rozvodů.

Tak jako každý prvek je i potrubí namáháno tlakem, tahem a ohybem. U potrubí ústředního vytápění je nejčastější namáhání v důsledku teplotní roztažnosti materiálu potrubí. Vzhledem k tomu, že u materiálů jako polypropylen PP nebo polyetylen PE je poměrné prodloužení již výrazné, je třeba, aby veškeré potrubí bylo vybaveno kompenzátory (vlnovci). Relativně často se na tato opatření zapomíná, především v individuální výstavbě rodinných domů. Často v rámci zjednodušení a úspor dochází k pouhému přichycení ke stěně v nedostatečném počtu připevňovacích bodů a zaomítání. To má za následek při vyšším rozdílu teplot prodloužení potrubí a jeho zvlnění ve stěně, čímž dojde k destrukci omítky nebo v případě podlahy k destrukci či vyboulení zálivky.

Při prodloužení potrubního vedení dochází nejen k tlaku, ale také ohybu a k namáhání ve stycích s armaturami a tvarovkami.

Dalším typem poškození, které spadá do této kategorie, je mechanické poškození v důsledku tlakových rázů. V tomto případě trpí převážně uzavírací armatury, ale v případě nevhodně

přípevněného potrubí může docházet i k nárazům potrubí do přilehlé konstrukce – například při zapnutí oběhového čerpadla nebo uzavření kulového ventilu.

6.3 *Rekonstrukce ústředního vytápění*

6.3.1 *Výměna armatur*

Jedná se o nejčastější typ rekonstrukce vytápěcí soustavy – tzv. Typ A dle [60]. Jedná se o výměnu radiátorových kohoutů nebo ventilů za termostatické, zavedení systému pro rozdělování nákladů (buď pomocí kalorimetrů, nebo pomocí poměrových měřičů tepla), osazení nových seřizovacích ventilů na stoupací potrubí, náhradu vypouštěcích kohoutů za kulové kohouty a osazení vyvažovacích ventilů pro řízení tlakových rozdílů (regulátory tlaku, vyvažovací ventily s diferenčním měřením tlaku). Právě požadavky na rozpočítání nákladů mezi bytové jednotky jsou součástí vyhlášky 194/2007 Sb. [30].

V ideálním případě je vyvážení soustavy navrženo již v projektu. Není-li však soustava vyvážená nebo nefunguje správně, je možné vyvažování soustavy instalovat dodatečně a provést tzv. náhradní seřizování. Při tomto seřizování se vyvažovací armatury nastavují tak, aby byly dodrženy teploty zpětné vody nebo tlakové rozdíly stoupacího potrubí. Při seřizování se armatury nastavují orientačně tak, aby na všech stoupacích potrubích byly totožné teplotní rozdíly [61].

Z hlediska účinnosti celé soustavy je nejdůležitějším parametrem armatur jejich tlaková ztráta, která by měla být co nejnižší. Zde je třeba najít rozumný kompromis mezi vzhledem a dynamikou systému a tlakovými ztrátami.

6.3.2 *Výměna otopných těles*

Nejde o častý typ rekonstrukce, protože otopná tělesa jsou považována z jednu z nejméně poruchových částí systému – tzv. rekonstrukce typu T [60]. Většinou se provádí společně s jiným typem rekonstrukce. Výměny probíhají především z důvodu změny vzhledu interiéru nebo z důvodu morálního zastarávání, někdy také z důvodu poškození nebo koroze ocelových těles, které nemají takovou životnost jako litinová článková tělesa.

Při rekonstrukci by se měla používat především ocelová desková nebo trubková tělesa, protože jsou lehčí, mají menší objem vody a tím i rychlejší náběh tělesa do plného výkonu. Výhodou je, že výrobci deskových těles vyrábějí také tělesa v provedení R – rekonstrukce, které mají stejné připojovací rozměry jako starší litinová článková tělesa. Díky tomu je možné vyměnit otopné těleso prakticky bez zásahu do potrubní sítě [63].

Před tímto typem rekonstrukce je třeba vypočítat tepelné ztráty budovy po místnostech [27], aby bylo docíleno vhodné distribuce výkonu po budově. V minulosti byla spousta objektů vybavována otopnými tělesy náhodně nebo odhadem. Ty objekty, které byly tělesy osazeny podle tepelných ztrát, zase proběhly většími či menšími změnami obvodového pláště (výměna oken, kontaktní zateplení) nebo došlo ke změně využívání místností. Proto je vhodné tyto výpočty vždy aktualizovat. Celou soustavu je třeba také dobře hydraulicky vyvážit.

V případě použití nízkoteplotního zdroje tepla je třeba navrhnout taková tělesa, která umožní dostatečné vychlazení vratné vody. Toto se týká především tepelných čerpadel a kotlů pracujících na principu kondenzace vody ve spalínách. Pro tyto zdroje se jako jedno z nejlepších řešení jeví využití velkoplošného vytápění (podlahové, stěnové, stropní).

6.3.3 Rekonstrukce potrubní sítě

Rekonstrukce typu P [60] se provádí poměrně vzácně, protože životnost potrubní sítě (v minulosti především ze svařovaných bezešvých trubek) je neobyčejně vysoká. Pokud se ukáže, že je třeba tuto rekonstrukci provést, většinou to má za následek nemalý únik oběhové vody. Pokud dojde k netěsnostem v potrubí kvůli agresivnější vodě při doplňování, je důležité spolu s výměnou potrubí osadit také armatury pro fyzikální úpravu vody (automatické odvzdušňovací ventily, katexové a jiné filtry).

V dnešní době se již potrubní sítě realizují z různých materiálů a systémů, které mají rychlejší a bezpečnější montáž. V případě nahrazování sítě s přirozeným oběhem teplotnosného média je třeba přepočítat tlakové ztráty a zmenšit dimenze potrubí dle současných standardů – přestavba na soustavu s nuceným oběhem teplotnosného média a s uzavřenou expanzní nádobou. Je třeba také myslet na to, že v minulosti nebyly tak přísné požadavky na tepelnou izolaci potrubí a v dnešní době je třeba splnit přísnější požadavky vyhlášky č. 193/2007 Sb. kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu [62]. Se snižováním teploty přívodní větve je požadavek na tepelné izolace ještě větší. Ve vytápěných místnostech není třeba potrubí tepelně izolovat. Ve vztahu k účinnosti systému vytápění je důležité, zaměřit se především na tepelnou izolaci potrubí v nevytápěných místnostech, která má na výslednou účinnost systému zásadní vliv. Vzhledem k tomu, že jednotlivé účinnosti dílčích součástí systému vytápění se vzájemně násobí, může nízká účinnost jednoho článku markantně zasáhnout celkovou účinnost systému jako celek.

Ve vztahu ke snížení provozních nákladů je dobré se také zaměřit na vyhodnocení, zda použité trubní rozvody odpovídají svou světlostí použité aplikaci. Při použití potrubí o větší světlosti

sice dojde ke zvýšení investičních nákladů do systému, ale systém jako takový bude mít menší tlakovou ztrátu, což může uspořit náklady na čerpací práci oběhových čerpadel, která je ve větších aplikacích již finančně patrná. V souvislosti s většími dimenzemi trubních rozvodů je třeba tuto dimenzi přenést i na tvarovky a prvky.

6.3.4 Rekonstrukce domovních kotelen, úpraven parametrů a ohříváčů

Jedná se o tzv. typ rekonstrukce K [60] a je k němu v mnoha případech již třeba stavební povolení. Týká se to rekonstrukcí, při nichž dochází ke změně paliva (například kotelna na uhlí přestavěna na plynovou kotelnu či nahrazena kaskádou tepelných čerpadel.

Kotelny v sobě zahrnují velké množství technologie, která je k poruchám náchylnější než zbytek systému. Výhodou však je, že je případná výměna sice nákladná, ale snadná a rychlá. Zvláště v dnešní době se kotelny přestavují nejen kvůli poruchám nebo opotřebením, ale také kvůli úsporám na vytápění, které jsou u tohoto typu rekonstrukce nemalé. Právě zdroj tepla (a princip jeho funkce) nejvíce ovlivňuje, jak objekt nakládá s primárními vstupy energií. Z tohoto důvodu jsou také investoři motivováni státními i evropskými dotačními programy, které subvencují a upřednostňují některé obnovitelné zdroje před fosilními palivy.

6.4 Výměna morálně zastaralého zdroje tepla

V praxi se často setkáváme s objekty, které jsou vybaveny již koncepčně zastaralým zdrojem tepla, který je díky dobré konstrukci stále v provozuschopném stavu. Jde například o uhelné odhořívací nebo prohořívací kotle velkých výkonů, které byly běžně instalovány do chat a hotelů a v mnohých fungují dodnes. Jde o kotel, který funguje v objektu již desítky let a díky své robustní konstrukci ještě nějakou dobu vydrží. Obsluha je zde však velmi náročná a účinnost těchto spalovacích zařízení nebyla vysoká ani v době, kdy byly tyto kotle uváděny do provozu. Po dodatečném zateplení objektu je navíc tento zdroj silně předimenzován a jeho regulace je velmi obtížná, ne-li nemožná.

Pokud je objekt vytápěn takovým zařízením, potom není hlavním důvodem výměna pro zachování funkce systému, ale pro zvýšení účinnosti a tím snížení provozních nákladů. Náklady v tomto případě neušetří pouze samotná účinnost zdroje tepla, ale také větší možnosti regulace zdroje a možné snížení podílu lidské práce při obsluze těchto zařízení. Za moderní spalovací zařízení na tuhá paliva jsou dnes považovány zejména kotle pyrolitycké (zplyňovací) a kotle automatické. U větších aplikací jsou to prakticky již výhradně kotle automatické, které mohou spalovat jak biomasu, tak i fosilní paliva. Od fosilních paliv se dnes ale všeobecně upouští díky evropské politice nahrazování fosilních paliv obnovitelnými zdroji [35].

7 OPTIMALIZOVANÝ AUTOMATICKÝ KOTEL NA VLHKOU BIOMASU

Disertační práce se zabývá možnostmi zvyšování účinnosti při spalování biomasy. Jelikož jsou možnosti spalování již na vysoké úrovni poznání, jeví se jako možná cesta využití tepla z kondenzace vodní páry, obsažené ve spalínách. U kotlů na plynná paliva se jedná dnes již o běžné řešení, které umožňuje zvýšit normovaný stupeň využití (relativní účinnost) až o 11 % [14]. Z tohoto důvodu se také dnes zemní plyn fakturuje v kWh. U kotlů na biomasu je toto řešení ojedinělé (viz kap. 6), ačkoliv umožňuje využít část rozdílu mezi výhřevností a spalným teplem paliva, který je vyšší než u zemního plynu [14]. Toto řešení bylo ověřováno na prototypu kondenzačního automatického kotle na vlhkou biomasu, který je umístěn na zkušebně Výzkumného energetického centra v rámci řešení projektu „Pre-seed aktivity VŠB-TUO - Energetické zdroje“. Na tomto zařízení byly také prováděny dílčí úpravy pro optimalizaci vývinu emisí ze spalování vlhké biomasy, zvýšení účinnosti a usnadnění provozu.

Automatický kotel na vlhkou biomasu je chráněn užitným vzorem CZ 25851 U1 [64], je přihlášen k patentovému řízení přihláškou vynálezu CZ 2013 – 106 A3 [65] a jednotlivé úpravy hořáků a kondenzačních jednotek jsou registrovanými funkčními vzorky, jichž je autor spolupůvodcem (072/26-09-2013_F, 073/26-09-2013_F, 110/06-12-2013_F, 076/30-09-2014_F) [66], [67], [68], [69]. Patent je vynález, kterému je vydáno osvědčení o vynálezu, udělené Úřadem průmyslového vlastnictví. Výsledkem uděleného patentu je ochrana původních výsledků výzkumu a vývoje, jež byly uskutečněny autorem nebo týmem, jehož byl autor součástí. Funkční vzorek je výsledkem výzkumu a vývoje, který byl uskutečněn autorem nebo týmem, jehož byl autor součástí. Funkčním vzorkem může být výrobek nebo přístroj, jehož vývoj byl cílem řešení projektu [70].

Experimentální automatický kondenzační kotel na vlhkou biomasu na základě užitého vzoru CZ 25851 U1 (původci: Ochodek, T., Koloničný, J., Horák, J., Krpec, K.) sestává z podstavce, hořáku, výměníku kotle, podavače paliva ze zásobníku, zásobníku paliva, řídicí jednotky, kondenzačního výměníku, spalínového ventilátoru a odpopelňovacího zařízení [64]. V rámci testování byl kotel uspořádán modulárně, aby bylo možné jednotlivé komponenty zaměňovat, případně odstavit z provozu. Díky tomuto uspořádání je možné ověřit přínosy jednotlivých zařízení a optimalizované prvky zabudovat a testovat při provozu. Jsou tak možné dílčí úpravy kondenzačních jednotek a dalších komponent bez zásahu do ostatních, které by následně ovlivňovaly výsledky dané úpravy.

Výše zmíněný kotel disponuje jmenovitým výkonem 100 kW při spalování vysušené dřevní hmoty s teplotním spádem 80 / 60 °C. V případě vlhké biomasy (až 50 % hm.) se jmenovitý výkon pohybuje v rozmezí cca 60 – 80 kW, dle vlhkosti paliva a použitého hořáku (roštu). Energetický přínos kondenzační jednotky se řádově pohybuje mezi 5 – 7 kW (přibližně na úrovni 10 % výkonu kotle). Výkon kondenzační jednotky by bylo možné zvýšit za cenu příliš nízké teploty na výstupu z jednotky a s tím spojených problémů s využitím nízkopotenciálního tepla v praktických aplikacích.

7.1 Problematika spalování biomasy

Dle vyhlášky č. 477/2012 Sb. [71] je mezi druhy podporované biomasy také zbytková hmota z těžby dřeva, biomasa vzniklá v lese z probírek a prořezávek, dřevní hmota z údržby veřejné a soukromé zeleně včetně tratí, vodotečí, rozvodů elektřiny apod. K tomu také zbytková dřevní hmota vznikající při výrobě celulózy, včetně kůry a štěpka vznikající při pilařském zpracování odkorněného a neodkorněného dřeva. Díky tomu je možné považovat odpadní čerstvou biomasu za podporovanou pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů. Biomasu pro energetické účely je třeba skladovat a transportovat na základě požadované vlhkosti. V případě potřeby spalovat suchou štěpku je třeba vytvořit běžnou zásobu paliva pro spalování a větší zásobu z důvodu snižování vlhkosti - sušení. Právě větší část zásob pro sušení znamená požadavek na prostor (v případě přirozeného sušení) nebo provozní náklady (v případě strojového sušení). S možností spalovat vlhkou štěpku odpadá potřeba zásoby paliva dělit a je možné kotel zásobovat pomocí systému „just in time“. Pro dopravu štěpky se používají zpravidla valníkové dopravní prostředky, které jsou běžné v zemědělství a technických službách (na rozdíl od dřevních pelet, které se vozí převážně v pytlích nebo cisternách).

Proti jiným palivům je biomasa specifická především proměnným a často vysokým obsahem vody, poměrně vysokým podílem prchavé hořlaviny a v případě fytomasy také nízkou teplotou tavitelnosti popeloviny [72]. Tyto informace se u biomasy zjišťují hrubým rozborem. Z těchto důvodů je při spalování biomasy důležitý poměrně velký přívod tepla pro dosušení paliva a dostatečný přívod kyslíku pro spálení prchavé hořlaviny. V případě velkých zařízení pro spalování fytomasy jsou využívány chlazené rošty, které zabraňují spékání popeloviny na roštu tím, že popel chladí pod teplotu tavitelnosti.

Spalování vlhké biomasy (také biomasy obecně) má svá specifika, jelikož se nejedná o dokonale vysušené palivo. Spalování biomasy (prosté hoření) má tyto fáze [73]:

- Fáze sušení – dochází k odstranění vlhkosti z paliva

- Fáze pyrolýzy – dochází k ohřívání paliva, přičemž se rozkládá organická hmota na hořlavé plyny, destilační produkty a zuhelnatělý zbytek
- Fáze spalování plynné složky – dochází k zápalu hořlavých plynů
- Fáze spalování pevných složek – dochází k oxidaci zuhelnatělého zbytku za přístupu dostatečného množství kyslíku (vytváří se CO, které dále oxiduje na CO₂)

Pokud bychom palivo zahřívali za nepřístupu vzduchu, uvolňoval by se tzv. „energoplyn“, který by bylo možné dále spalovat jako jakákoliv jiná plynná paliva.

Pro přesnější určení složení biomasy je třeba tzv. prvkový rozbor biomasy, který zjišťuje hmotnostní obsah prvků jak základních (C, H₂, S, N, O₂), tak také ostatních (Cl, F, apod.) [73], které mohou mít vliv na životnost kotlových součástí a na životní prostředí jako takové.

Při spalování obilovin hnojených a ošetřovaných průmyslově se může vyskytnout až 180 mg/m³ HCl, která způsobuje vysokoteplotní korozi. Další podstatnou skupinou polutantů vznikajících spalováním chloru jsou persistentní organické polutanty (POPs), mezi něž patří především [74]:

- Polychlorované aromatické uhlovodíky - PAH
- Polychlorované bifenylly – PCB
- Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany – PCDD/F

7.2 Spalovací komora a hořák

Spalovací komora se na rozdíl od standardních kotlů na biomasu odlišuje především použitými materiály. Komora je provedena z korozivzdorné (austenitické) oceli a je nadstandardně doplněna prvky z žáruvzdorného betonu. Použití žáruvzdorného betonu má v komoře především funkci akumulace sálavé složky tepla, uvolněné při spalování paliva. Žáruvzdorný beton je použit na vstupních dvířkách a jsou z něj odlity deflektory nad hořáky (primární a sekundární), které usměrňují sálavou složku tepla, uvolněného při spalování zpět na rovinu primárního hořáku. Toto řešení umožňuje soustředit předem naakumulované teplo na primární hořák a zvýšit tak výkon předsušení paliva. Nad spalovací komorou je vodní výměník opatřený spalinovými průduchy s turbulátory, které zapříčiní zpomalení toku spalin a jejich bližší kontakt se stěnami vodního výměníku. Turbulátory jsou proti zanášení prachem zajištěny pravidelným čištěním, které má na starosti vestavěná elektronická regulace kotle.

Primární spalovací vzduch je přiveden otvory v roštu primárního hořáku. Sekundární spalovací vzduch je přiváděn otvory v sekundárním hořáku (obvodovém elementu kolem primárního hořáku - viz Obr. 11 a Příloha 3).

Spalování je řízeno lambda sondou, která kontinuálně měří koncentraci O_2 ve spalinách na základě požadovaného přebytku spalovacího vzduchu reguluje ventilátory pro přívod primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Kotel je vybaven automatickým zapalováním paliva pomocí horkovzdušné trysky.

7.2.1 Hořák H1

Primární hořáky (dále také jen hořáky) byly v průběhu vývoje testovány 3. První primární hořák (dále také hořák 1 nebo H1) je klasické retortové konstrukce (konický hořák s přívodem paliva odspodu) z korozivzdorné oceli a spalování probíhá po celém povrchu hořáku. Přívod paliva je odspodu hořáku v jeho středu. Přepad tuhého nedopalu a popela je na obvodu a je zajišťován otočnými čepelemi (viz Obr. 8), které zajišťují čištění roštu a otvorů pro přívod primárního spalovacího vzduchu (dále také roštovací kolo). Po celém povrchu hořáku jsou otvory, které zajišťují přívod primárního spalovacího vzduchu na rovinu hořáku. Jeho výhodou je velká plocha a tím daný velký výkon hořáku. Nevýhodou je, že vlhké palivo přichází na rovinu hořáku spodem pod již hořící palivo bez předsušení.



Obr. 8 – Hořák 1 pro spalování vlhké biomasy po demontáži (foto: L. Martiník)

pozn.: Na obrázku je znázorněn původní konický hořák 1. Vprostřed hořáku je otvor, jímž je přiváděno palivo a na povrchu hořáku (roštu) jsou patrné drobné kruhové otvory, které slouží pro přívod primárního spalovacího vzduchu. Na obvodu hořáku je umístěno roštovací kolo, které svými čepelemi shrnuje zbytky paliva a popel z otvorů pro přívod primárního spalovacího vzduchu. Palivo se po roštu při spalování posunuje směrem zevnitř k obvodu hořáku a přepadává do sběrné nádoby na popel, odkud je šnekovým podavačem odváděn do vynášecí nádoby.

7.2.2 Hořák H2

Druhým testovaným primárním hořákem byl rovný hořák s nátrubkem (dále také hořák 2 nebo H2). Hořák 2 má vodorovný rošt z korozi-vzdorné (austenitické) oceli s otvory pro přívod primárního spalovacího vzduchu. Uprostřed roštu prochází palivo přes nátrubek, který přesahuje cca 8 cm nad rošt (Obr. 9). Hořící vrstva paliva na roštu produkuje teplo, které je v první řadě využito k ohřevu nátrubku. Palivo procházející nátrubkem je zahříváno a předsušováno (voda obsažená v palivu se mění na vodní páru a odchází kolem deflektoru se spalinami do odvodu spalin) a po průchodu nátrubkem přepadává na rošt. Roštovací kolo zajišťuje čištění roštu a přívodů primárního spalovacího vzduchu. Hořák je registrován jako funkční vzorek 073/26-09-2013_F (původci: Horák, J., Martiník, L., Krpec, K., Ochodek, T., Koloničný, J.) [66].



Obr. 9 – Hořák 2 pro spalování vlhké biomasy při montáži (foto: L. Martiník)

pozn.: Na obrázku je rovný hořák 2 s komínkem pro spalování vlhké biomasy při zabudování do spalovací komory. Konstrukce hořáku je obdobná jako v předchozím případě. Palivo je přiváděno středem hořáku přes komínek, v němž probíhá předsušení paliva. Palivo po průchodu komínkem přepadává přes jeho okraj a dopadá na rovný rošt s přívody primárního spalovacího vzduchu. Na obrázku jsou dále patrné osazené termočlánky pro měření teplot ve spalovací komoře.

7.2.3 Hořák H3

Třetím testovaným byl primární korunkový hořák (dále také hořák 3 nebo H3). Tento hořák konstrukčně vychází z předcházejícího typu H2, ale komínek je transformován do tvaru cimbuří (korunky). Měřením bylo zjištěno, že nátrubek má výrazný vliv na výkon hořáku, jelikož dochází ke spalování paliva jen na obvodu nátrubku. Proto byla zvolena konstrukce s korunkou,

která byla vytvořena částečným prořezem nátrubku (Obr. 11). Díky této úpravě dochází k zapálení paliva již během předsušování v korunce a dochází ke zvětšení celkové plochy spalovaného paliva a tím i k navýšení tepelného výkonu hořáku. Hořák je také vybaven roštovacím kolem. Hořák je registrován jako funkční vzorek 076/30-09-2014_F (původci: Horák, J., Martiník, L., Krpec, K., Ochodek, T., Koloničný, J.) [67].



Obr. 10 – Hořák 3 pro spalování vlhké biomasy a obvodový přívod sekundárního spalovacího vzduchu (foto: L. Martiník)



Obr. 11 – Hořák 3 pro spalování vlhké biomasy a obvodový přívod sekundárního spalovacího vzduchu s podpěrami pro deflektor – sekundární hořák (foto: L. Martiník)

pozn.: Na obrázku je rovný hořák 3 s korunkou pro spalování vlhké biomasy při zabudování do spalovací komory. Konstrukce hořáku je obdobná jako v předchozím případě. Palivo je přiváděno středem hořáku přes korunku, v níž

probíhá předsušení paliva a po dostatečném předsušení také k zápalu paliva. Palivo po průchodu korunkou přepadává přes její okraj a dopadá na rovný rošt s přívody primárního spalovacího vzduchu. Na obrázku je také patrné celkové zabudování do spalovací komory – kolem hořáku je umístěn prstenec s otvory, který slouží jako přívod sekundárního spalovacího vzduchu a nad prstencem je umístěn deflektor z žáruvzdorného betonu, který směřuje sálavý výkon zpět na rovinu hořáku a napomáhá jak lepšímu předsušení paliva, tak také dokonalejšímu spalování.

7.3 Kondenzační jednotka

Kondenzační jednotka umožňuje využívat teplo obsažené ve vlhkých spalínách a uvolňuje se při kondenzaci vody na povrchu výměníku. Vlhkost ve spalínách je dvojího druhu - vlhkost vznikající spalováním vodíku a vlhkost obsažená v palivu. Zatímco plynové kondenzační kotle využívají vlhkost vznikající spalováním vodíku, kondenzační výměník u kotle na pevná paliva umožní získat teplo i z kondenzace vody, obsažené v palivu (dřevní štěpka pro spalování v kotlích na tuhá paliva má běžnou energetickou vlhkost $< 30 \%$ hm.). V případě úpravy spalovací komory je možné spalovat štěpku s energetickou vlhkostí $> 40 \%$ hm., takže je možné spalovat štěpku bez předsušení (čerstvou štěpku z prořezů, lesní činnosti nebo z technologických procesů zpracování řeziva).

Kondenzační jednotka má také významný přínos ve snížení koncentrace tuhých znečišťujících látek (prachu), které průchodem přes kondenzační jednotku ulpívají na vlhkém vnitřním povrchu jednotky a kondenzující voda je poté splachuje do sběrné nádrže a dále do přepadu (viz Obr. 12). Aby bylo možné sledovat chování kondenzační jednotky při různých provozních stavech a chování kondenzátu, byly do obou prototypů kondenzační jednotky provedeny otvory se zasklením (viz Obr. 13 a Obr. 14).

Samočistící efekt výměníků je důležitý pro správnou funkci kondenzační jednotky, protože usazené nečistoty ze spalin (prach, dehty apod.) izolují výměník a tím snižují schopnost kondenzace. Právě zanášení a obtížné čištění je největší konstrukční výzvou kondenzačních spalinových výměníků, protože na stékající kondenzát ulpívají tuhé znečišťující látky a výsledná směs může být značně viskózní a dojde k ucpání mezer mezi žebry kondenzační jednotky.

7.3.1 Kondenzační jednotka KJ1

Byly testovány 2 kondenzační jednotky rozdílných konstrukcí. První kondenzační jednotkou (dále také kondenzační jednotka 1 nebo KJ1) byla skříňová kondenzační jednotka se dvěma komorami, v nichž jsou umístěny litinové vodní výměníky (Obr. 13). Tyto výměníky jsou ochlazovány vodou (případně jiným médiem), která umožňuje využití kondenzačního tepla spalin. Na výměnících dochází ke kondenzaci vody, obsažené ve spalínách. Výměníky jsou zavěšeny svisle, aby docházelo při stékání kondenzátu k samočistícímu efektu. Ve spodní části

kondenzační jednotky je sběrná nádoba kondenzátu s přepadem a vypouštěním kondenzátu. Kondenzační jednotka je registrována jako funkční vzorek 072/26-09-2013_F (původci: Horák, J., Martiník, L., Krpec, K., Ochodek, T., Koloničný, J.) [68]. Výkresová dokumentace viz Příloha 1.



Obr. 12 – Ukázka kondenzátu odebraného v přepadu kondenzační jednotky (foto: L. Martiník)

pozn.: Kondenzát je silně znečištěn, jelikož se jednalo o jeden z prvních odběrů. Znečištění kondenzátu mají na svědomí především částice tuhých znečišťujících látek (prachu).



*Obr. 13 – Kondenzační jednotka 1 připojená na chlazení a spalínovou cestu
(foto: L. Martiník)*

pozn.: Kondenzační dvoukomorová jednotka 1 s průzory je připojena k měřicí smyčce pomocí flexibilních izolovaných hadic a ocelových kolen s jímkami pro termočlánky Pt100. Z této strany jednotky jsou zobrazeny termočlánky Pt100 na vstupu a výstupu z kondenzační jednotky, díky nimž dochází k výpočtu výkonu jednotky.

Z opačné strany kondenzační jednotky je pak umístěn ještě jeden termočlánek Pt100 na propojení mezi komorami, aby bylo možné monitorovat výkony v jednotlivých komorách jednotky. Spalinový ventilátor je umístěn mezi kondenzační jednotkou a kotlem.

7.3.2 Kondenzační jednotka KJ2

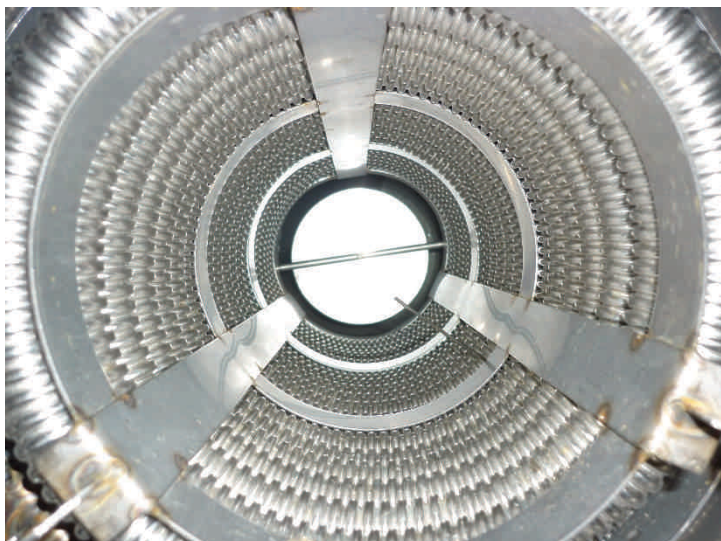
Druhá kondenzační jednotka (dále také kondenzační jednotka 2 nebo KJ2) je jednokomorová. Je možné ji zdvojit a vytvořit tím dvoukomorovou kondenzační jednotku. Kondenzační jednotka 2 má dvojitý spirálový výměník z korozi-vzdorné oceli po obvodu komory v plášti z korozi-vzdorné oceli. Aby spaliny neprocházely kondenzační jednotkou příliš rychle, je na jejím konci v cestě spalin integrován brzdící element, který zajistí zbrzdění toku spalin a rozptýlení po celém objemu kondenzační jednotky (Obr. 15). Kondenzační jednotka má ve spodní části sběrnou nádobu s přepadem a vypouštěním kondenzátu. Výměníky jsou spirálovitě stočené, aby umožňovaly stékání kondenzátu po povrchu výměníku a byl zajištěn samočistící efekt. Kondenzační jednotka je registrována jako funkční vzorek 110/06-12-2013_F (původci: Horák, J., Martiník, L., Krpec, K., Ochodek, T., Koloničný, J.) [69].



Obr. 14 – Kondenzační jednotka 2 připojená na chlazení a spalinovou cestu

(foto: L. Martiník)

pozn.: Kondenzační spirálová jednotka 2 je umístěna na podstavci, v němž je umístěna kondenzátní jímka s přepadem. Kondenzační jednotka je stejně jako její předchůdce připojena za spalinovým ventilátorem a na rozdíl od předchůdce je tepelně izolována. Podstavec má dvě kondenzátní jímky, aby bylo v případě potřeby možné přidat druhou kondenzační jednotku pro zvýšení výkonu.



Obr. 15 – Pohled na vnitřní spirálové výměníky a brzdící element v KJ2 (foto: L. Martiník)

pozn.: Kondenzační spirálová jednotka 2 při pohledu shora dovnitř. Na obrázku jsou patrné spirálovitě stočené korugované výměníky z korozivzdorné (austenitické) oceli. Jedná se o dvojité stočenou spirálu. Ve spodní části jednotky je umístěna brzdící klapka, která zajišťuje, že spaliny při průchodu kondenzační jednotkou neprojdou vysokou rychlostí středem, ale jsou nuceny projít mezi spirálami a proudění spalin je touto klapkou zpomaleno.

Pro zjištění dlouhodobé funkce samočištění výměníku by bylo zapotřebí testovací provoz v plném zatížení. Výkresová dokumentace viz Příloha 2.

7.4 Úprava podávání paliva

Zásobování palivem je realizováno ze zásobníku paliva, jež je součástí modulárního kotle pomocí šnekového podavače. Podavač byl v průběhu testů optimalizován pro různé druhy štěrky. Kvalitní čistá dřevní štěrka procházela podavačem bez problému a klenbování paliva bylo zabráněno pomocí mechanismu (dvě posuvné desky), který posunuje palivo po šikmých stěnách zásobníku paliva směrem k podavači. Při zkouškách s nekvalitní štěpkou z prořezů (větvičky, jehličí, kůra) docházelo ke klenbování paliva v zásobníku a šnekový podavač palivo vyhrnoval zpět do zásobníku. Proto byl šnekový podavač upraven pro tento druh štěrky pomocí návarků na hrany šnekového podavače, které zabraňují zpětnému vyhazování paliva.

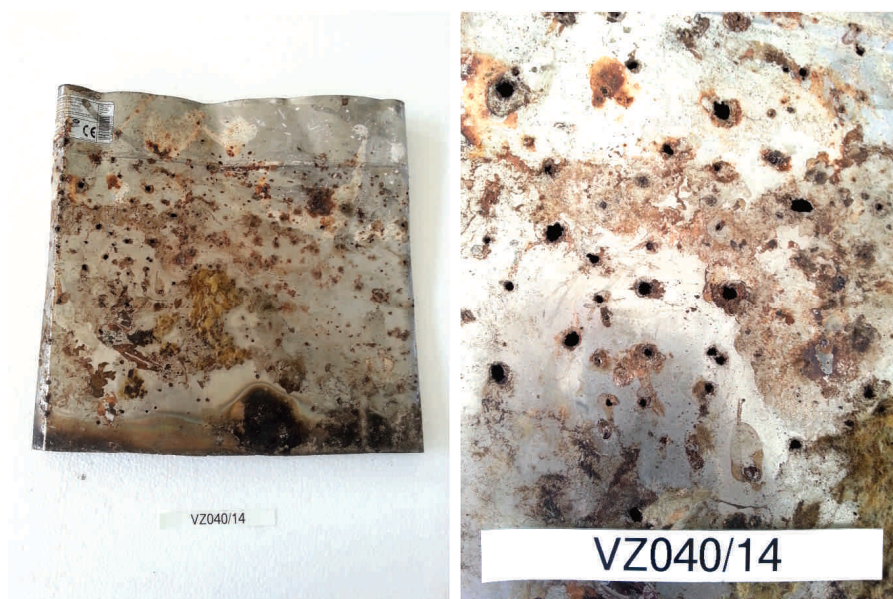
V rámci testování byl také průběžně upravován regulační program řídící jednotky kotle, který v závislosti na nastavených požadavcích (tepelný výkon, koncentrace O₂ ve spalínách, druh paliva) upravuje časové poměry podávání paliva a výkony ventilátorů přívodního primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Regulace zasahuje také do výkonu odtahového ventilátoru.

7.5 Požadavky na odkouření

Vzhledem k charakteru kondenzační jednotky je třeba podotknout, že spaliny za kondenzační jednotkou jsou sice z hlediska absolutní vlhkosti sušší, ale teplota spalin (kolem 60 °C) se pohybuje jen těsně nad teplotou rosného bodu spalin a dochází tedy částečně ke kondenzaci vody v komínu (kouřovodu). Tomuto faktu musí být kouřovod přizpůsoben jak materiálovou charakteristikou, tak konstrukčním řešením jako jiné části kotle a kondenzační jednotky, které musí být vyrobeny z korozivzdorné (austenitické) oceli a svým uspořádáním musí umožnit odtékání kondenzátu do sběrné jímky, která má přepad do kanalizačního napojení. Vhodné řešení bylo využito u kondenzační jednotky KJ2, jejíž podstavec obsahoval dvě jímky s přepady (viz Obr. 14 a Příloha 2). Nad jednou jímkou byla umístěna kondenzační jednotka a vstup spalin do kondenzační jednotky, nad druhou jímkou bylo vyústění komínu z korozivzdorné oceli. Voda, která kondenzovala na povrchu komínového tělesa, volně stékala do jímky u paty komína a přepadem odtékala do kanalizačního napojení (v případě experimentálních měření do odběrného kbelíku při vypouštění v cyklech).

Materiály, použité pro odkouření a části kotle ohrožují především dva typy koroze. Síranová a chlorová koroze se projevují odlišně a dle dosavadních poznatků je možné vzájemným poměrem síranů a chloridů při spalování výslednou korozi významně ovlivnit [75][76] – viz Obr. 17. Chlorová koroze se projevuje nejčastěji bodovou korozí (pitting), která může perforovat materiál. Síranová koroze působí postupným oslabováním materiálu. Výhodou síry je, že je možné její důsledky minimalizovat vyšší teplotou spalování, případně odsiřováním. Koroze způsobená sírany se navíc nejeví z pohledu životnosti zařízení tak agresivně, jako chlorová, která působí hloubkově. V případě biomasy je navíc obsah síry v palivu zanedbatelný.

Z materiálového hlediska je tedy třeba především dbát na opatření proti chlorové korozi, která je při spalování biomasy největším rizikem pro kondenzační část kotle, potažmo odkouření – viz Obr. 16. Lze použít buďto vysokolegované austenitické korozivzdorné oceli s vysokým obsahem Mo (Molybden), nebo použít ochranné nástříky z epoxidových pryskyřic, polypropylenu, atd. [18]. I při použití austenitických ocelí není zajištěna dostatečná odolnost vůči chlorové korozi, která je stále aktuálnější z důvodu širšího využívání biomasy, ve které je obsah chloridů vyšší než ve fosilních palivech (zejména v ječné slámě a krmném šťovíku) [77].



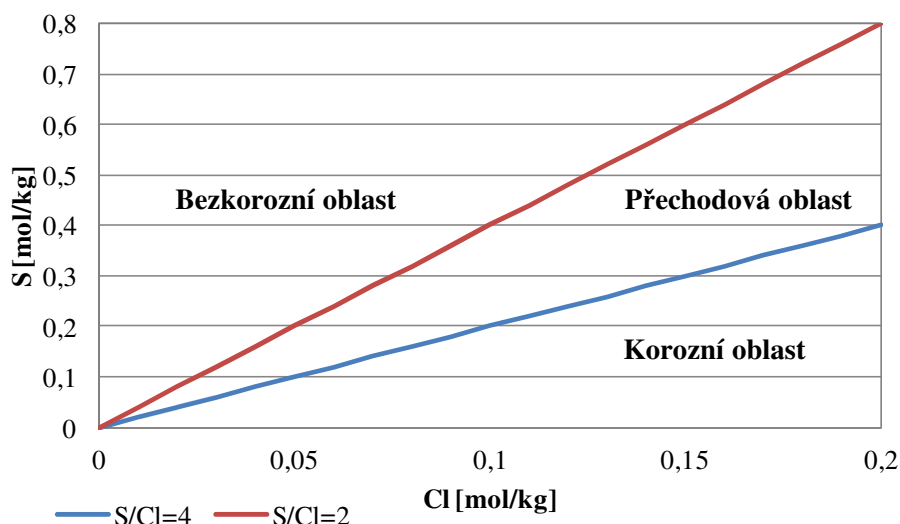
Obr. 16 – Ukázka bodové koroze způsobené chlorem na vzorku plechu z korozivzdorné oceli použité na odvod spalín (foto: VEC)

pozn.: Bodová koroze znázorněná na tomto obrázku je nebezpečná především tím, že ačkoliv je materiál v jejím okolí částečně oslaben, bodová koroze způsobila perforace materiálu, což je u odvodu spalín problematické jak z pohledu použitelnosti, tak také bezpečnosti. V tomto případě se navíc jednalo o austenitickou ocel 17 349 (AISI 316L), která je normou předepsaná pro toto použití a měla by být dostatečně odolná v prostředí spalín. Při analýze těchto vzorků bylo zjištěno, že tuto důlkovou hloubkovou korozi způsobily chloridy (chloridy, které jsou obsaženy v palivu, případně i v přívodním vzduchu, reagují s kondenzující vodou a vytváří kyselinu chlorovodíkovou HCl). Síranová koroze se projevuje úbytkem materiálu v celé ploše.

Za zamyšlení stojí také řešení v podobě přidávání elementární síry nebo síranu amonného do spalovacího procesu. Oxidy síry reagují s chloridy a pomáhají tak bránit chlorové korozi – viz vzorec (25) [75][78].



Výhodou této reakce je, že síran draselný je netěkavý a odstraní se spolu s popílkem, resp. se vypustí spolu s kondenzátem. HCl je výrazně menším korozním rizikem, neboť i při nižších teplotách zůstává vysoce zředěná v plynné fázi [78] – ke kondenzaci by došlo až v kondenzační jednotce, která tomu musí být materiálově uzpůsobena. Závislost chlorové koroze na poměru chloru a síry v palivu je patrná z následujícího grafu na Obr. 17.



Obr. 17 – Diagram závislosti chlorové koroze na poměru chloru a síry v palivu [78]

Na základě tohoto diagramu se ukazuje, že vhodnějším palivem z hlediska poměru síry a chloru je dřevo. Podstatně horší poměr (hluboko v korozní oblasti) má fytomasa, jako je například šťovík krmný, ječná sláma apod. [77].

8 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ OPTIMALIZACE KOTLE

Experimentální ověření provozních vlastností automatického kondenzačního kotle probíhalo na zkušebně Výzkumného energetického centra VŠB – TU Ostrava. Kotel a jeho jednotlivé moduly byly smontovány a připojeny na soustavu teplotních čidel, měřicí smyčky a odvod spalin s analyzátozem spalin. Teplotní čidla (termočlánky typu K) byla osazena především ve spalovací komoře, na přívodu primárního spalovacího vzduchu, v kondenzační jednotce a na odtahu spalin z kotle a kondenzační jednotky. Tyto teploty sloužily pro sledování procesů a dějů v jednotlivých částech kotle, v jednotlivých fázích spalování a pro následné přepočty.

Automatický kotel byl propojen s prototypem kondenzační jednotky a napojen na odtah spalin izolovaným komínem (40 mm izolace v pouzdře z korozi-vzdorné oceli), který odpovídá požadavkům normy ČSN EN 303-5:2013 [11]. Odtah spalin byl realizován ředícím tunelem [48] dle [49], který umožňuje pomocí PID (proporcionální, integrační, derivační) regulátoru řídit komínový tah na požadovanou hodnotu a simuluje také reálné podmínky (možné transformace částic ve spalinách za komínem), tudíž je možné odebírat tuhé znečišťující látky reprezentativně. Dalším důvodem je odběr částic PM₁₀, PM_{2,5} (PM = particulate matter) a nanočástic, pro jejichž odběr je v komínu příliš vysoká koncentrace a vlhkost a je tedy třeba spaliny před odběrem ředit. Ředící tunel nasává přes digestoř spaliny a ředící vzduch z okolí. Odvod spalin je realizován přes spalinový ventilátor. V tomto případě byl prach měřen německou aparaturou WOEHLER SM 96 dle 1. BImSchV (2010) [23], která odsávala spaliny z komínu v tzv. měřícím úseku spalin ve výšce 1,5 m nad výstupem spalin z kondenzační jednotky do komínu. Ve stejném vzorkovacím místě byly odebírány také plynné emise, které byly měřeny aparaturou pro měření plynných emisí ABB.

K měření byly použity 2 měřicí smyčky zároveň (smyčka 1 pro měření výkonu a parametrů kotle a smyčka 2 pro měření parametrů kondenzační jednotky), takže bylo nutné upravit software, aby toto umožňoval. Veškeré údaje byly vyhodnocovány společně ve stejných časových intervalech, aby bylo možné kvantifikovat a srovnat jednotlivé veličiny. Měřicí smyčka pro teplovodní kotle se skládá ze soustavy teplotních čidel (teploty vody jsou měřeny odporovými termočlánky Pt100), kalibrovaného průtokoměru a směšovacích a regulačních ventilů, které umožňují nastavit optimální hodnoty teplotního spádu na okruhu kotle i okruhu chlazení.



Obr. 18 – Automatický kotel na biomasu s kondenzační jednotkou připojený na měřicí smyčky a analyzátory spalin (foto: T. Chleboun)

Zkoušky probíhaly na různých typech dřevní štěpky a při různých vlhkostech paliva. Vzhledem k faktu, že vlhká štěpka není považována za palivo, ale odpadní biomasu, nebylo možné koupit palivovou štěpku. Štěpka byla získávána z firmy Biocel Paskov a. s. (dále také jen Biocel), z pily Mayr - Melnhof Holz Paskov, s r. o. (dále také MM Holz) a ze zahradnictví Ivánek Zeman, V. o. s. v Paskově (dále také pouze zahradnictví v Paskově), které zajišťuje údržbu zeleně a prořezy kolem technologických sítí. Z Biocelu Paskov a. s. a pily Mayr - Melnhof Holz Paskov, s r. o. byla získávána čistá dřevní štěpka bez kůry (vhodná především na výrobu celulózy) a ze zahradnictví v Paskově byla získávána směsná odpadní biomasa, v níž se vyskytovaly i příměsi ve formě jehličí, kůry, drobných větviček a listů.

Vzhledem k nerovnoměrné vlhkosti ve dřevní štěpce byla měření vlastností paliva prováděna na více vzorcích v různých vrstvách násypky paliva a vzorky byly záměrně odebrány ve větším objemu (cca 100 g), aby byla nejistota měření vlhkosti paliva co nejnižší.

Výrobě prototypu kotle předcházela měření na jiných existujících zařízeních a jejich úpravách, na nichž byl prověřován princip kondenzace vodní páry ze spalin. Na základě těchto pokusů byl potom navržen první prototyp kotle.

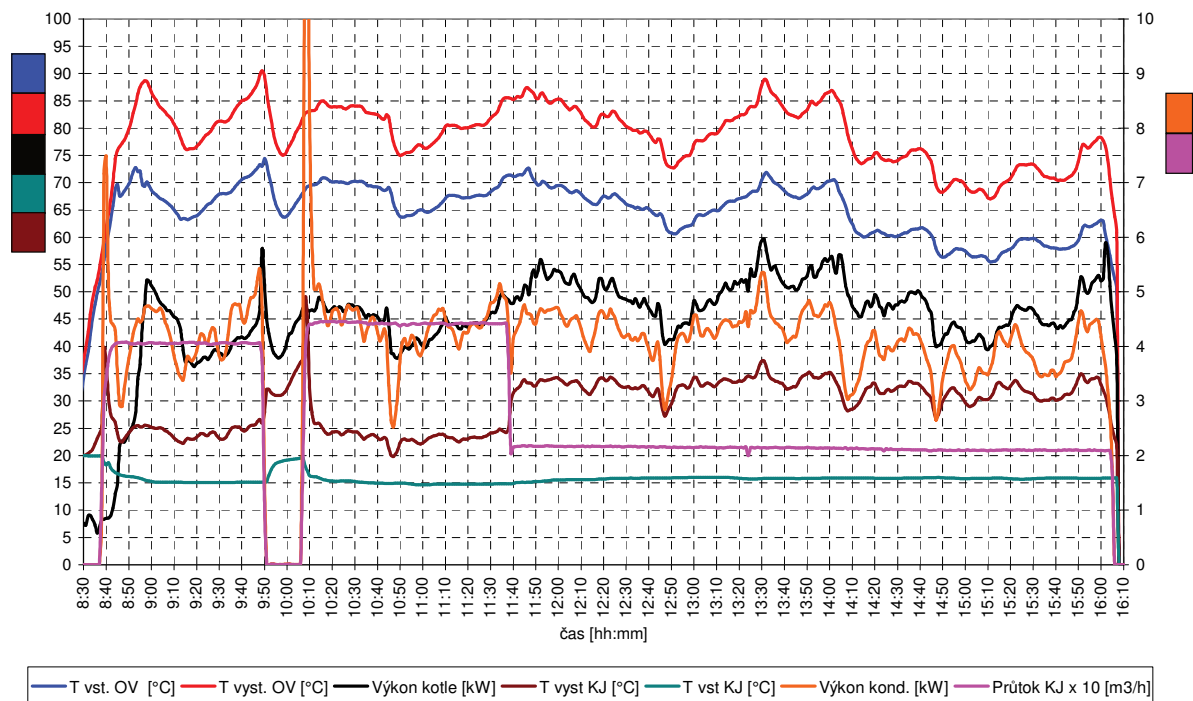
8.1 Zkoušky kotle v konfiguraci KJ1 a H1

První kombinací jednotlivých modulů a prvků bylo spojení kotle s klasickým retortovým hořákem H1 se skříňovou kondenzační jednotkou s litinovými výměníky KJ1. Pro spalovací zkoušky byla použita vlhká čistá dřevní štěpka (Biocel Paskov). V této konfiguraci byl

především ověřován přínos kondenzační jednotky k celkovému výkonu kotle a schopnost spalovat vlhkou štěpku při provozu na jmenovitý výkon.

První zkouška byla provedena v této konfiguraci s protiproudým zapojením kondenzační jednotky (studená vstupní voda byla napojena v místě výstupu spalin z kondenzační jednotky). Vlhká dřevní štěpka měla v době zkoušek vlhkost cca 40 % hm. K zapalování paliva bylo použito automatické zapalování systému kotle, které bylo v řídicí jednotce přenastaveno pro potřeby delšího zápalu vlhkého paliva. Byly odstraněny netěsnosti vzniklé montáží čidel a byl nastaven stabilní komínový tah 20 Pa. Kotel byl řízen lambda sondou s požadavkem na $O_2 = 10 \%$. Podávání paliva bylo nastaveno na režim 13/3 (13 sekund je šnekový dopravník poháněn a 3 sekundy je odstaven). Pro chlazení kondenzační jednotky byla použita voda z vodovodního řádu (teplota cca 16°C) – důvodem měření bylo především ověřit schopnost kondenzační jednotky ochladit spaliny natolik, aby docházelo ke kondenzaci. V průběhu měření byl v závislosti na režimu měněn průtok chladicí vody pro kondenzační jednotku.

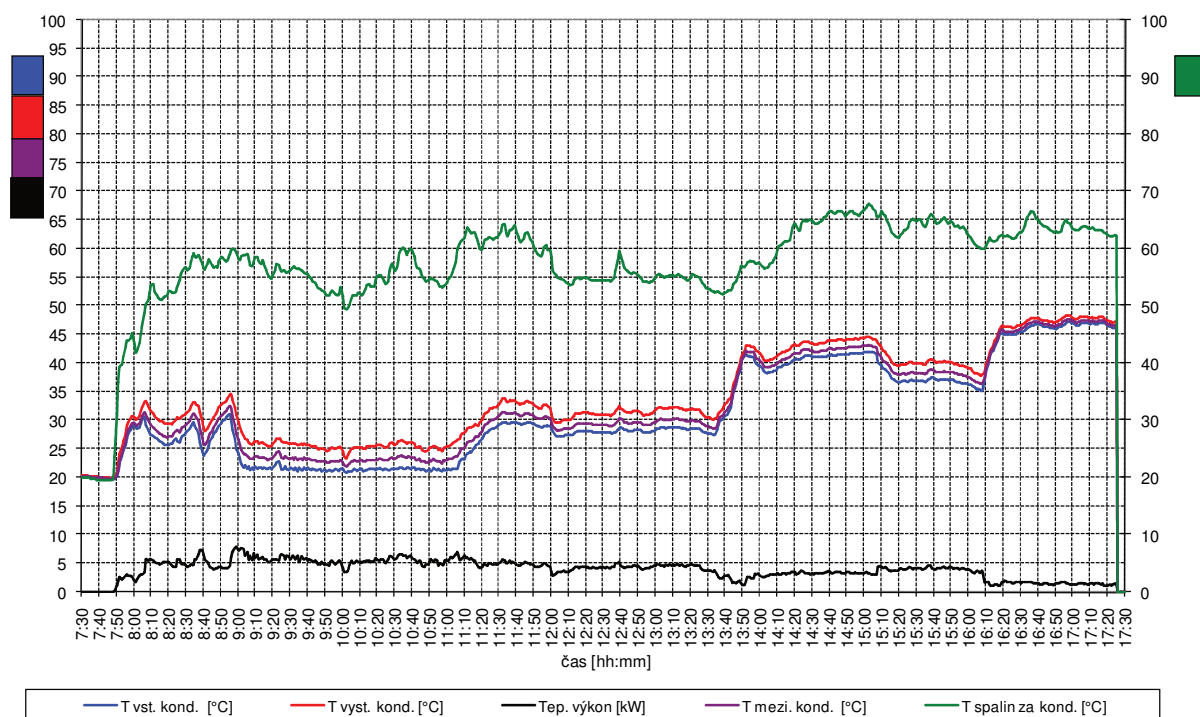
V kondenzační jednotce docházelo ke kondenzaci přibližně v množství 4 kg/h, což odpovídá získanému teplu cca 9,8 MJ/h (2,7 kW). Teploty vody v kotlovém okruhu a v okruhu kondenzační jednotky jsou spolu s průtokem KJ a výslednými přepočtenými výkony znázorněny v souhrnném grafu na Obr. 19.



Obr. 19 – Graf průběhů výkonu kotle a kondenzační jednotky, teplot vody a průtoku kotle a kondenzační jednotkou ze dne 23. 10. 2012

Jak vyplývá z Obr. 19, měřený výkon kondenzační jednotky je vyšší, než vypočtený výkon dle množství kondenzátu. Kondenzační jednotka nepředává do teplotnosné látky jen výkon daný kondenzací vodní páry ze spalin, ale také konvekčně předané citelné teplo spalin, které oplachují výměník při průchodu kondenzační jednotkou. Díky kondenzaci vody na stěnách výměníku je využit také nižší odpor při přestupu tepla ze spalin do stěny výměníku (v tomto případě litina). Při tomto měření bylo pozorováno, že kondenzace probíhá pouze v první komoře kondenzační jednotky, takže druhá komora zůstávala suchá a podílela se na výkonu jednotky jen částečně. Podíl výkonu jednotlivých komor nebylo možné ověřit.

Při dalším měření bylo přidáno teplotní čidlo do hydraulického propojení mezi dvěma komorami kondenzační jednotky KJ1, které umožnilo stanovit poměr, v jakém se rozděluje tepelný výkon kondenzační jednotky v první a druhé komoře. Kondenzační jednotka již nebyla chlazena z vodovodního řadu, ale pomocí vlastní chladicí smyčky s uzavřeným okruhem teplotnosné látky. Palivo bylo použito ze zdroje Biocel Paskov o energetické vlhkosti přibližně 30 %. Kondenzace probíhala v obou komorách kondenzační jednotky a výkon jednotlivých komor byl přibližně rovnoměrný, jak vyplývá z Obr. 20.



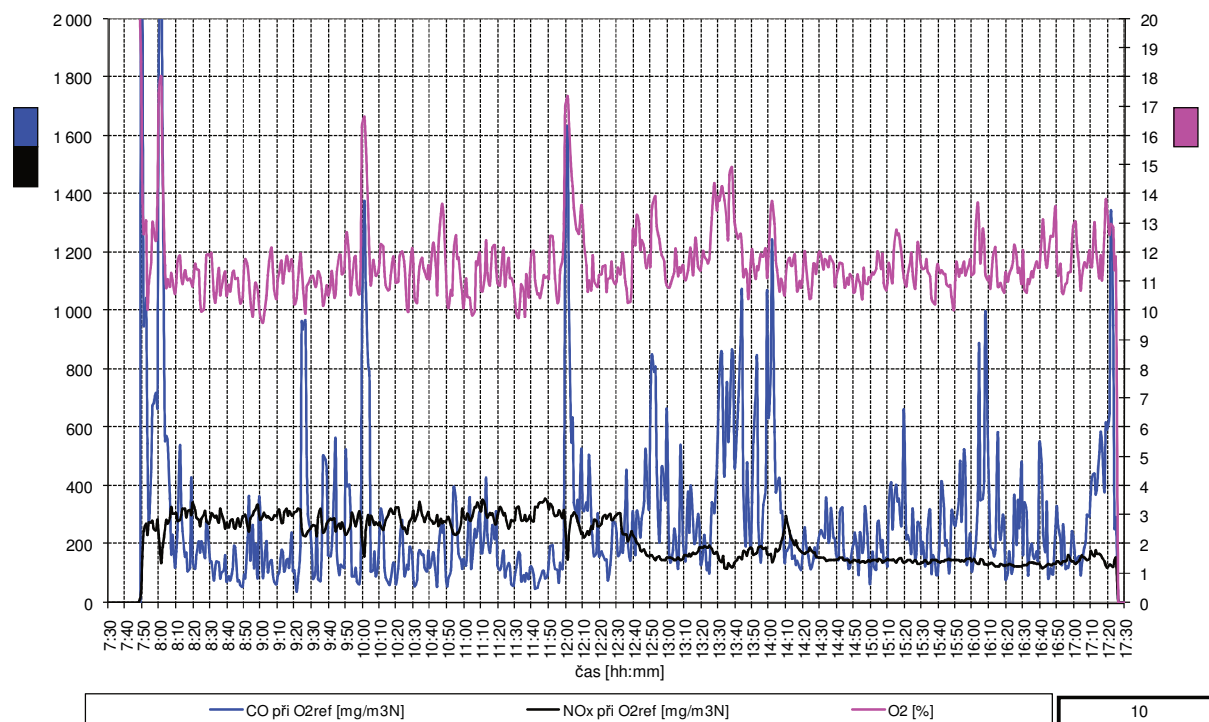
Obr. 20 – Graf průběhů výkonu kondenzační jednotky, teplot vody a průtoku kondenzační jednotkou a teplota spalin za kondenzační jednotkou ze dne 20. 3. 2013

Předchozí problémy s kondenzací pouze v první komoře byly způsobeny pravděpodobně příliš nízkou teplotou chladicí vody a příliš velkým průtokem. Díky tomu došlo ke kondenzaci v první

komoře a spaliny odcházely do druhé komory již příliš chladné. Dále bylo pozorováno přerušení kondenzace při teplotách teplotnosného media na vstupu do kondenzační jednotky kolem 45 °C. Tato teplota již nedokázala ochladit výměník pod teplotu rosného bodu spalin.

Kondenzát byl pravidelně odebírán jedenkrát za hodinu a vážen. Odebraný kondenzát vykazoval vysoký stupeň znečištění a je tedy pravděpodobné, že má kondenzační jednotka pozitivní vliv na snižování emisí tuhých znečišťujících látek (prachu). Prach nebyl při těchto režimech měřen.

Díky nízké vlhkosti paliva a stálému jmenovitému výkonu bylo spalování provázáno velmi nízkým vývinem emisí CO a regulace dokázala udržovat stabilní přebytek spalovacího vzduchu – viz měřený O₂ ve spalinách na Obr. 21. Organické uhlovodíky ve spalinách měřeny nebyly.



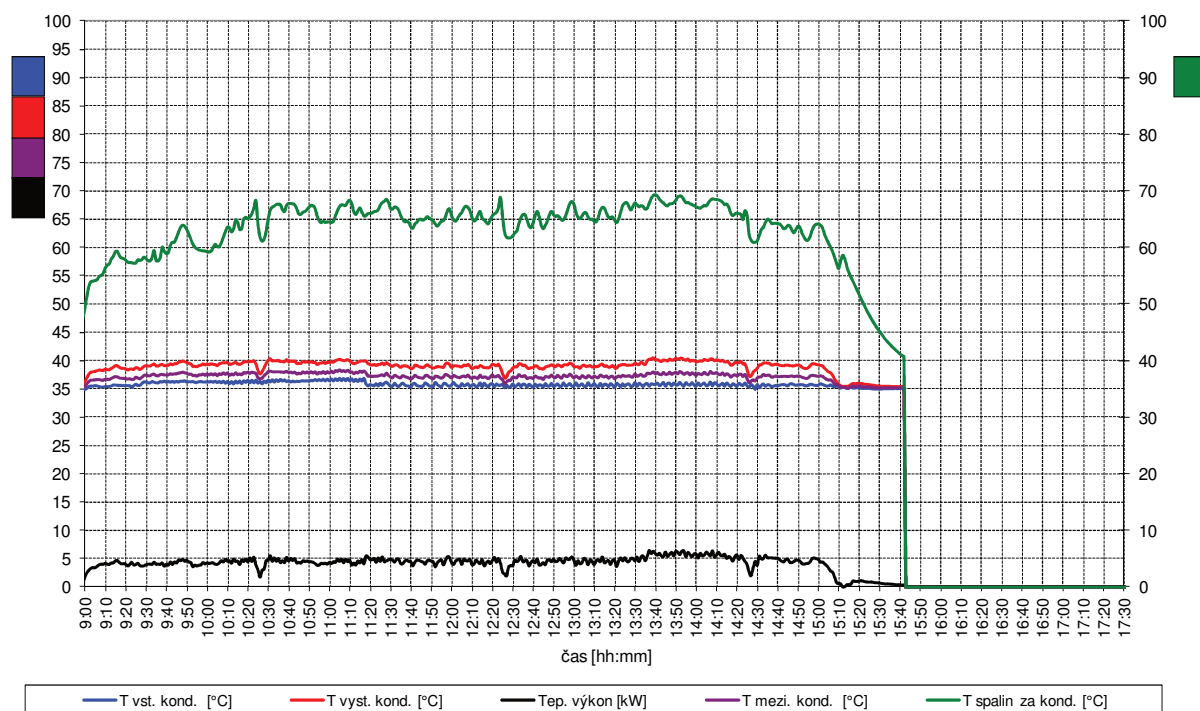
Obr. 21 – Emise CO a NO_x přepočtené na referenční O_{2,REF}=10 %, KONCENTRACE O₂ ze dne 20. 3. 2013

Při měření emisí znečišťujících látek ze spalování byl patrný trend zvyšování koncentrace CO a koncentrace O₂ ve spalinách ve dvouhodinových intervalech. Toto navýšení bylo způsobeno pravidelným čištěním turbulátorů (rozrážeč proudu spalin - šroubovice, která ovlivňuje proud spalin, procházejí vodním výměníkem kotle), které řídí automatická regulace kotle. Turbulátory jsou kvůli své expozici zanášeny prachem a každé dvě hodiny dojde k jejich otáčení a tím setřesení nahromaděného prachu. Tyto cykly jsou jasně patrné jak v Obr. 21, tak i v dalších měřeních – např. Obr. 23. Turbulátor má v kotli důležitou funkci. Nejen že zpomaluje průtok

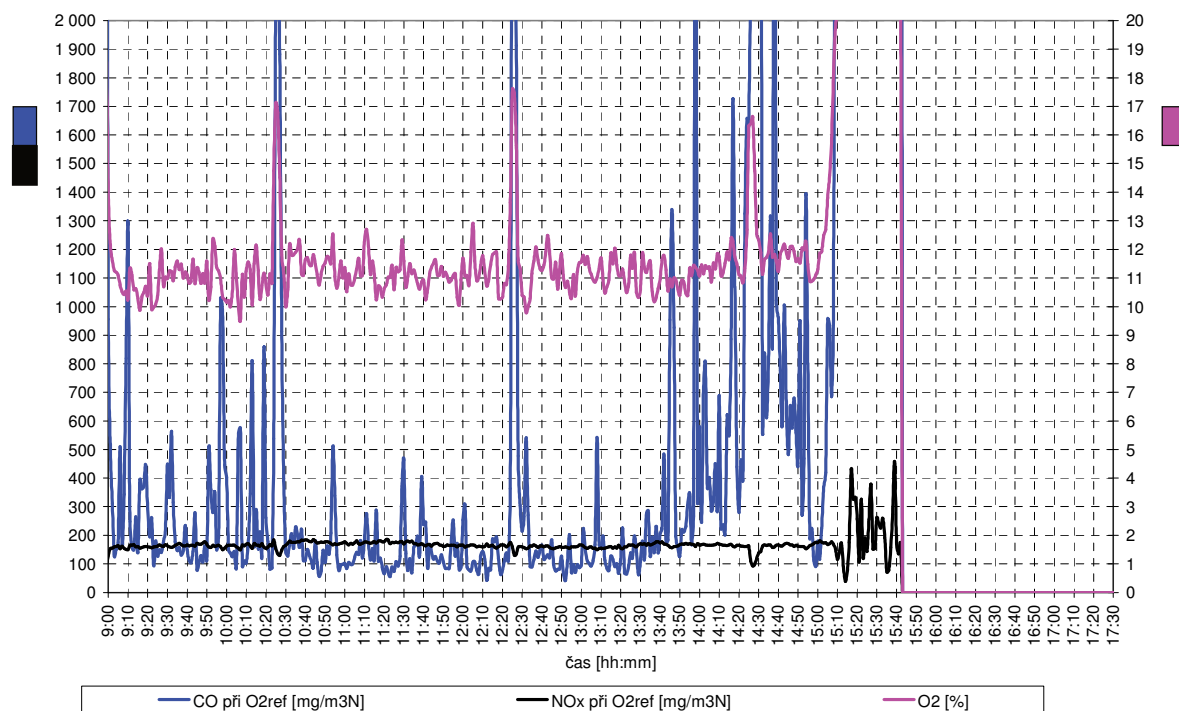
spalin přes vodní výměník, ale aerodynamicky působí na proud spalin tak, že jej rozvíří a ten se díky tomu dostane do těsnějšího kontaktu s teplosměnnými plochami.

Na základě metodických postupů (viz kapitola 5.2) je celková účinnost celého zařízení vypočtena nepřímou metodou. Účinnost přirozeně stoupá s mírou vychlazení spalin, odcházejících do komína. Je tedy třeba zvážit, na jakou teplotní úroveň si můžeme dovolit spaliny ochladit, aby byly požadavky na komín přiměřené přínosu v účinnosti.

Kondenzační jednotka byla ke smyčce připojena tak, že byla měřena teplota na vstupu a výstupu do kondenzační jednotky, ale také na přechodu mezi jednotlivými komorami kondenzační jednotky, což je důležité pro rozlišení přínosu jednotlivých komor kondenzační jednotky. Rozdíl mezi těmito teplotami je jasně patrný z Obr. 22.



Obr. 22 – Graf průběhů výkonu kondenzační jednotky, teplot vody a průtoku kondenzační jednotkou a teplota spalin za kondenzační jednotkou ze dne 25. 4. 2013



Obr. 23 – Emise CO a NO_x přepočtené na referenční $\text{O}_{2, \text{REF}} = 10\%$, KONCENTRACE O_2 ze dne 25. 4. 2013

Z měření v této konfiguraci vyplynula tato zjištění:

- Během zkoušky se kondenzační jednotka chovala podle předpokladů a docházelo ke kondenzaci rovnoměrně v obou stupních kondenzační jednotky. Během stabilního provozu jednotka produkovala rovnoměrně cca 3,4 kg kondenzátu za hodinu. Kondenzát po zápalu byl více znečištěn TZL, než kondenzáty z pozdějších odběrů.
- Při jednom z režimů byla také naměřena nižší koncentrace nanočástic za kondenzační jednotkou – nanočástice nebyly měřeny pravidelně, pouze pro ověření hypotézy.
- Kotel pracoval s palivem s rel. vlhkostí 38% s nízkou úrovní emisí CO. Palivo s vlhkostí 45% a více kotel v automatickém režimu s nastavením lambda sondy na 10% O_2 již spálit nedokázal. Došlo k poklesu výkonu a zhoršení emisí.
- Energetický přínos jednotky se pohyboval při chlazení na 35°C kolem 9% výkonu kotle.
- Během zkoušky byla pozorována kondenzace v komínové soustavě.
- Na povrchu chladiče kondenzační jednotky dochází k vytváření filmu znečištění.

Především zjištění o nižší koncentraci nanočástic potvrzuje původní předpoklad, že kondenzační jednotka díky svému geometrickému tvaru a povrchům smáčeným kondenzátem zachycuje část tuhých znečišťujících látek a díky stabilnímu vývinu kondenzátu je tento prach splachován do kondenzátní jímky. Vývin kondenzátu je prakticky přímo úměrný

vlhkosti paliva, které je v kotli spalováno. Součástí měření bylo pravidelné vypouštění kondenzátu z kondenzátní jímky, abychom zjistili jeho množství. Vypouštění bylo realizováno převážně v hodinových intervalech nebo v případě změny režimu kotle. Při vypouštění se odebíral vzorek kondenzátu na rozbor, aby bylo možné určit složení kondenzátu a nezávadnost pro vypouštění do kanalizace bez úpravy - Obr. 24.



Obr. 24 – Odebrané vzorky kondenzátu na rozbor

pozn.: Vzorky byly odebírány přepadem z kondenzátní jímky kondenzační jednotky. Vzorky jsou ve 250 ml lahvičkách připraveny na analýzu.

Kondenzát byl otestován v laboratoři Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě (akreditovaná zkušební laboratoř AZL 1393). Jedná se o protokol č. 43088/2014, který je uveden v příloze – viz Příloha 4.

Z tohoto protokolu je patrné, že celková suma polyaromatických uhlovodíků je rovna 0,13 $\mu\text{g/l}$. Veškeré naměřené hodnoty v porovnání s hodnotami přípustnými pro vypouštění kondenzátu do kanalizace (hodnoty pocházejí z požadavků severomoravských vodovodů a kanalizací a. s. – město Bohumín) jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 – Požadované limity pro vypouštění odpadních vod do kanalizační sítě pro město Bohumín a naměřené hodnoty kondenzátu.

Ukazatel	Hodnota	Jednotka	Limit	Nejistota
fenoly	2,2	mg/l	10	$\pm 15\%$
nerozpuštěné látky	190	mg/l	500	$\pm 20\%$
pH	5,4	-	6,0 - 9,0	$\pm 0,3$
suma PAU	0,13	$\mu\text{g/l}$	10	$\pm 20\%$

Z této tabulky vyplývá, že kondenzát je možné po úpravě pH (běžná úprava kondenzátu před vypouštěním) běžně vypouštět do kanalizační sítě. Pro úpravu pH je možné použít neutralizační

jednotku obdobnou jako pro kondenzační plynové kotle. Jedná se o plastový kontejner s neutralizačním granulátem (zpravidla hydroxid hořečnatý, který je třeba v čase nahrazovat. Částečně kyselý kondenzát nebývá pro kanalizaci problémem, jelikož částečně eliminuje vliv čisticích prostředků, které jsou vesměs zásadité povahy. Problémem jsou kondenzáty s pH kolem 3,7 [79]. Povaha kondenzátu z vytápění je taková, že tento kondenzát tvoří jen velmi malé procento odpadních vod z objektu. Reálným rizikem pro kanalizaci je tedy tento kondenzát hlavně pro domovní kanalizaci a přípojku, než dojde k jeho naředění v jednotné kanalizaci. Proto musí být při návrhu odvodu kondenzátu brán na zřetel především materiál kanalizační přípojky a domovní kanalizace tak, aby odolával nižšímu pH. Například v Německu a ve Švýcarsku je možné vypouštět kondenzát bez úpravy až do 200 kW výkonu kotle v případě, že je zajištěno naředění kondenzátu ostatními odpadními vodami [80][81]. V případě kondenzačního kotle na biomasu by pravděpodobně bylo obdobné řešení možné takovým způsobem, že by byl kondenzát odváděn do jímky spolu s odpady z vytápěného objektu a kyselost by byla měřena na výstupu z této jímky. Potom se dá předpokládat pH v limitech pro vypouštění odpadních vod do společné kanalizace.

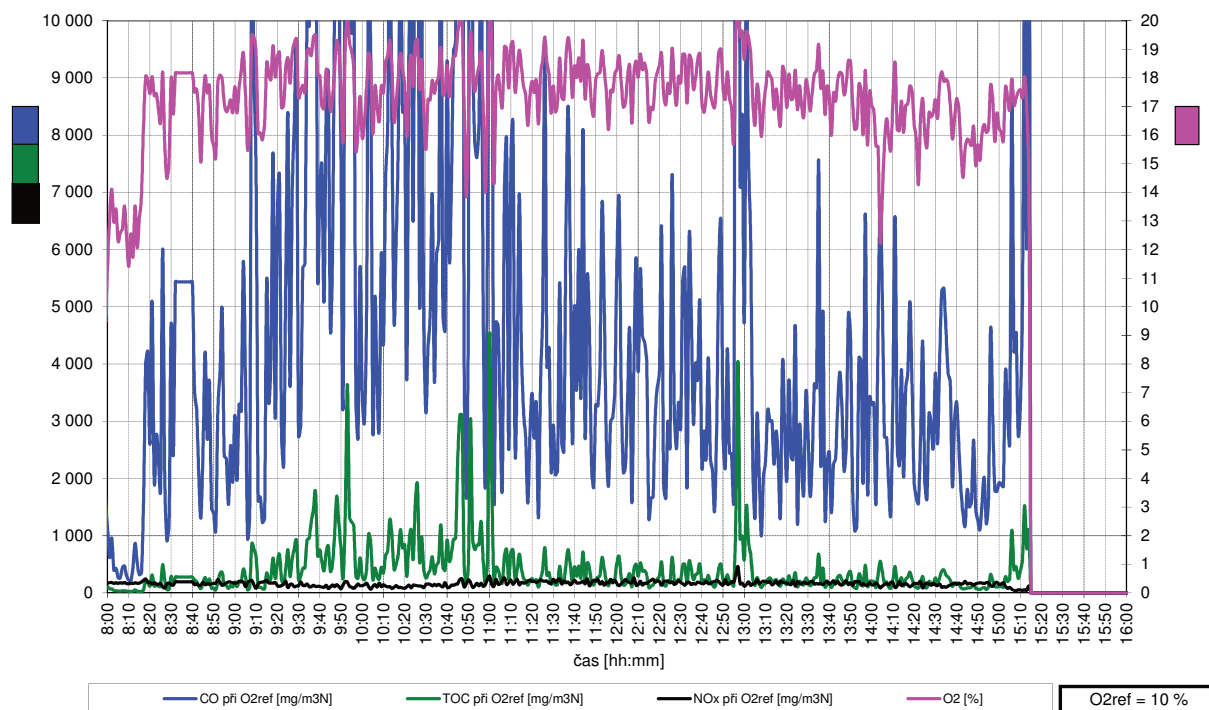
Kotel byl také provozován na jmenovitý výkon (cca 55 kW) s palivem o vlhkosti 48 % - čerstvá dřevní štěpka. Při tomto režimu vykazoval kotel celkovou účinnost sestavy až 98 % (ve vztahu k výhřevnosti paliva) – viz Tab. 11.

8.2 Zkoušky kotle v konfiguraci KJ1 a H2

Na základě předchozích měření, při nichž nebylo možné spálit palivo s vlhkostí vyšší než 40 % při sníženém výkonu, bylo nutné přistoupit k úpravám hořáku. Hořák H2 (popsaný v kapitole 7.1) má na roštu navařený nátrubek, jímž se vlhké palivo přivádí a předsušuje. Palivo, které je dopravováno na hořák prochází nátrubkem nad rovinu roštu a je prohříváno a předsušováno spaliny z hoření paliva na roštu. Při sníženém výkonu je sice tepelný výkon hořáku nižší, ale také dopravované množství paliva úměrně klesá. Předpokladem tedy bylo, že hořák poskytne dostatek výkonu pro předsušení paliva i při sníženém výkonu. Vliv na celkový výkon hořáku má také jeho geometrie, která omezuje plochu hořícího paliva a tím také celkový jmenovitý výkon.

Kotel byl provozován na snížený výkon (cca 20 - 24 kW) s palivem o vlhkosti až 48 % hm. - čerstvá dřevní štěpka. Při tomto režimu vykazoval kotel s inovovaným hořákem celkovou účinnost sestavy cca 96 % (ve vztahu k výhřevnosti paliva), při nižší vlhkosti paliva až 99 % – viz Tab. 11.

Při zkouškách bylo zjištěno, že kotel dokáže spálit palivo o vlhkosti 40 % při sníženém výkonu a je při takto nízkém výkonu schopen provozu. Emise CO se pohybovaly řádově na úrovni 3000 mg/m³_N při měřeném obsahu O₂ – viz Obr. 25.



Obr. 25 – Emise CO a NO_x přepočtené na referenční O_{2,REF}=10 %, KONCENTRACE O₂ ze dne 5. 9. 2013

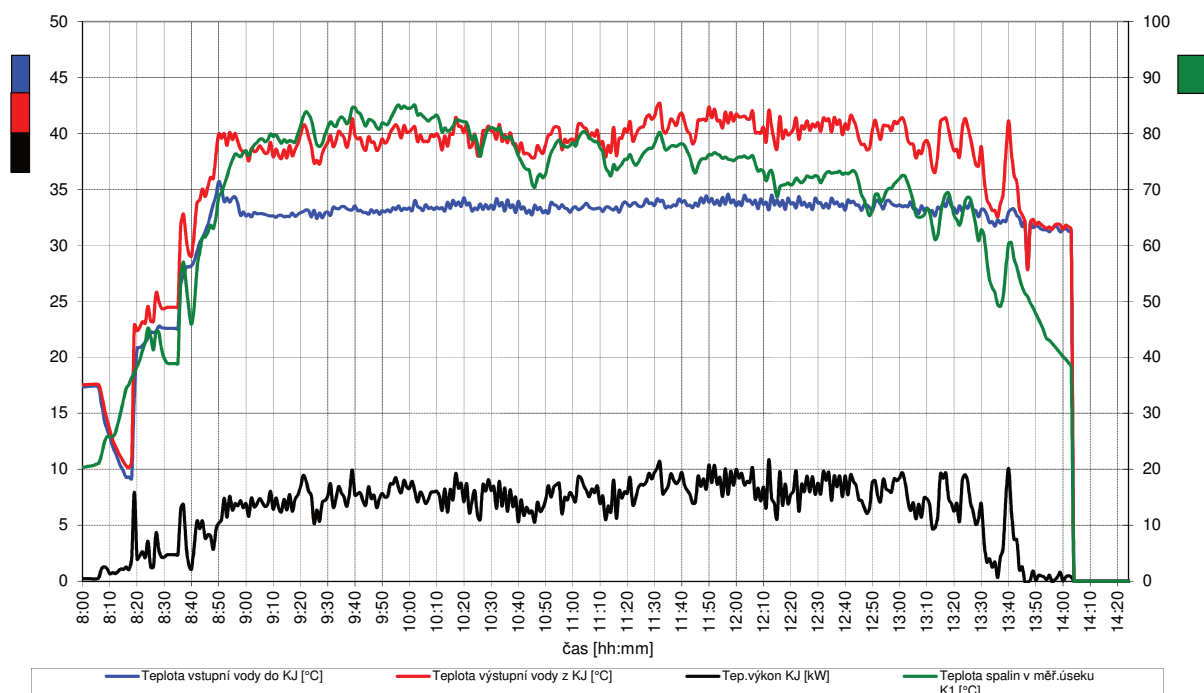
Z těchto měření vyplývá, že hořák s komínkem (hořák H2) umožňuje stabilně udržet snížený výkon i při vysoké vlhkosti paliva (cca 48 % hm.). Prodloužení přívodu paliva nad rovinu hořáku umožní částečné předsušení a zmenšená plocha primárního hořáku má vliv na menší reakční plochu paliva a tím také nižší výkon. Nevýhodou je relativně velká spalovací komora a vysoký přebytek spalovacího vzduchu ve spalovací komoře.

8.3 Zkoušky kotle v konfiguraci KJ2 a H2

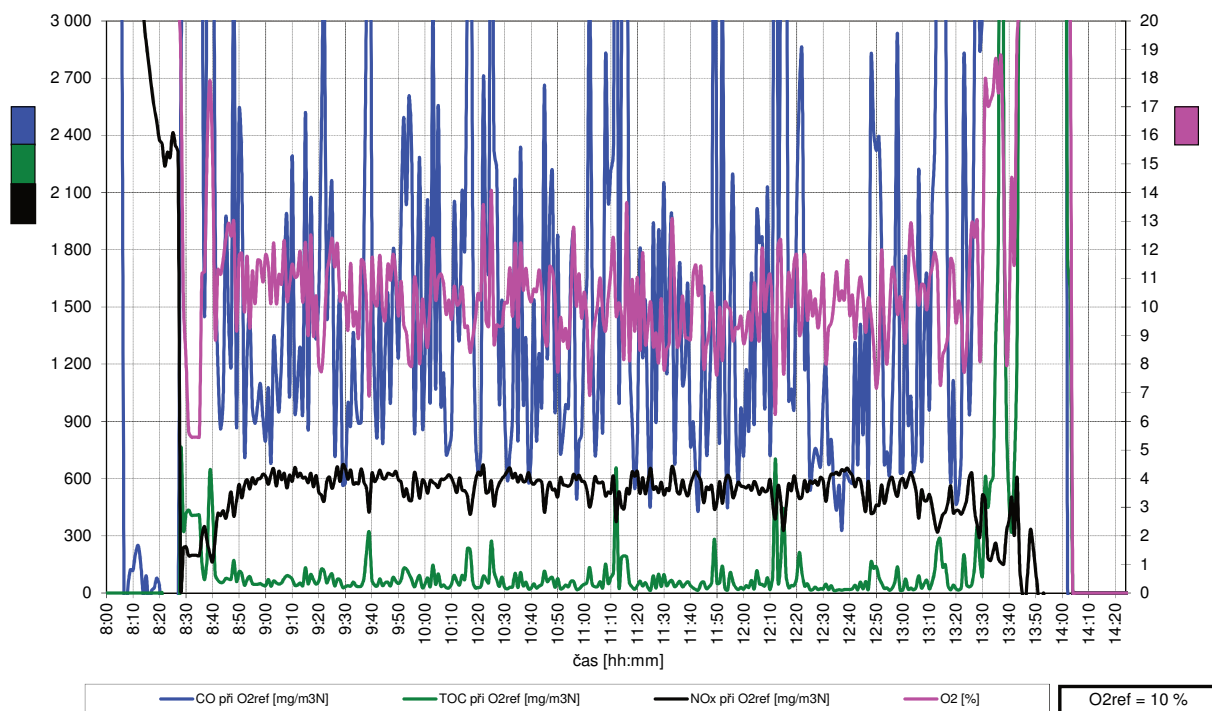
Oproti předchozím měřením byla použita kondenzační jednotka odlišné konstrukce (KJ2). Tato jednotka je mnohem kompaktnější při zachování stejné teplosměnné plochy kondenzačního výměníku. Pro srovnání funkce obou kondenzačních jednotek byl zachován jmenovitý výkon jednotky (teplosměnná plocha výměníku). Aby byly výsledky přínosu kondenzační jednotky srovnatelné, byly režimy měření nastaveny s obdobnými okrajovými podmínkami, jako v předchozích konfiguracích. Výhodou nové kompaktní kondenzační jednotky je také možnost zařadit 2 jednotky za sebe sériově tak, že ochlazené medium projde nejdříve výstupní kondenzační jednotkou (poslední na cestě spalin do komína) a poté vstupní kondenzační

jednotkou (jednotka za výstupem spalin z kotle). Tím je možné využít na maximum kondenzaci vodní páry ze spalin – tento princip byl již vyzkoušen u kondenzační jednotky 1, která měla dvě komory (vstupní a výstupní). Po ověření funkce kondenzační jednotky byly režimy dále upravovány pro dosažení co nejnižších emisí CO a TOC.

Z níže uvedeného grafu (Obr. 26) je patrné, že při jmenovitém výkonu kotle byla schopna kondenzační jednotka dosahovat výkonu téměř 10 kW při teplotním spádu $41^{\circ}\text{C} / 34^{\circ}\text{C}$. Tento teplotní spád je široce využitelný především pro velkoplošné systémy vytápění (podlahové, stěnové a stropní vytápění, nízkoteplotní otopná tělesa apod.). Je třeba poznamenat, že palivo bylo při tomto režimu velmi vlhké (cca 48 % hm.).



Obr. 26 – Graf průběhů výkonu kondenzační jednotky, teplot vody a průtoku kondenzační jednotkou a teplota spalin za kondenzační jednotkou ze dne 27. 11. 2013



Obr. 27 – Emise CO a NO_x přepočtené na referenční $\text{O}_{2,\text{REF}}=10\%$, KONCENTRACE O_2 ze dne 27. 11. 2013

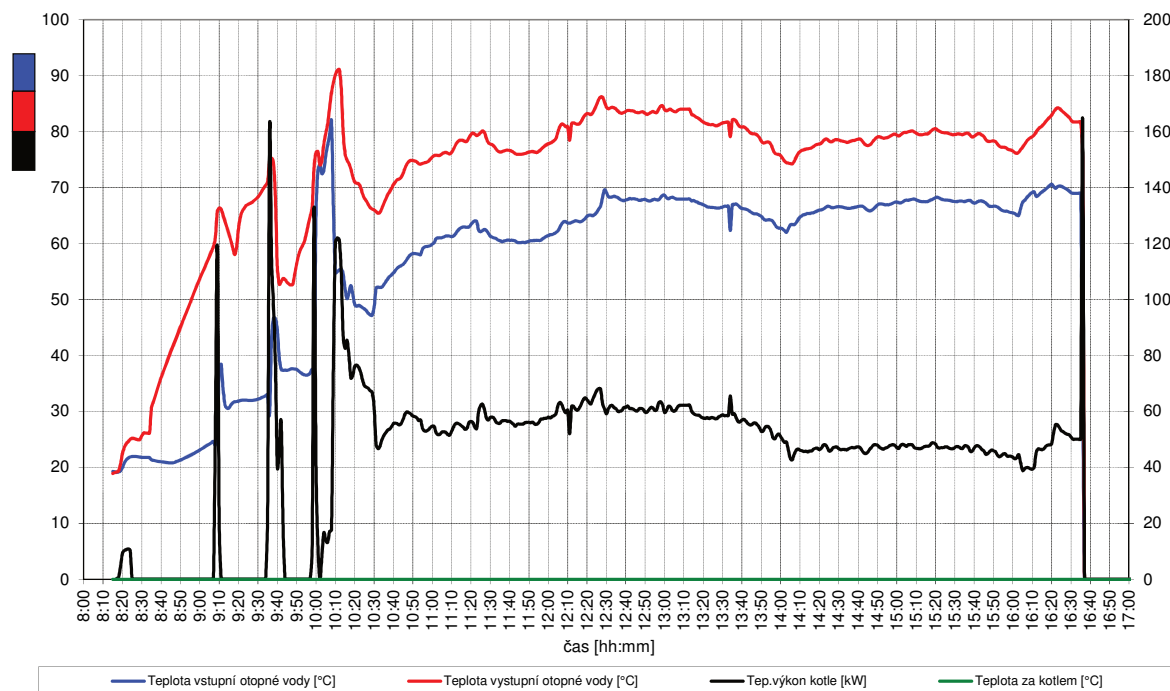
Zjištění plynoucím z těchto zkoušek se dá shrnout takto:

- Kondenzační spirálová jednotka KJ2 pracuje obdobně a její výkon je roven cca 10 % výkonu kotle
- Hořák H2 pravděpodobně nepředsušuje palivo tak jak bylo předpokládáno a i při jmenovitém výkonu jsou emise znečišťujících látek relativně vysoké.

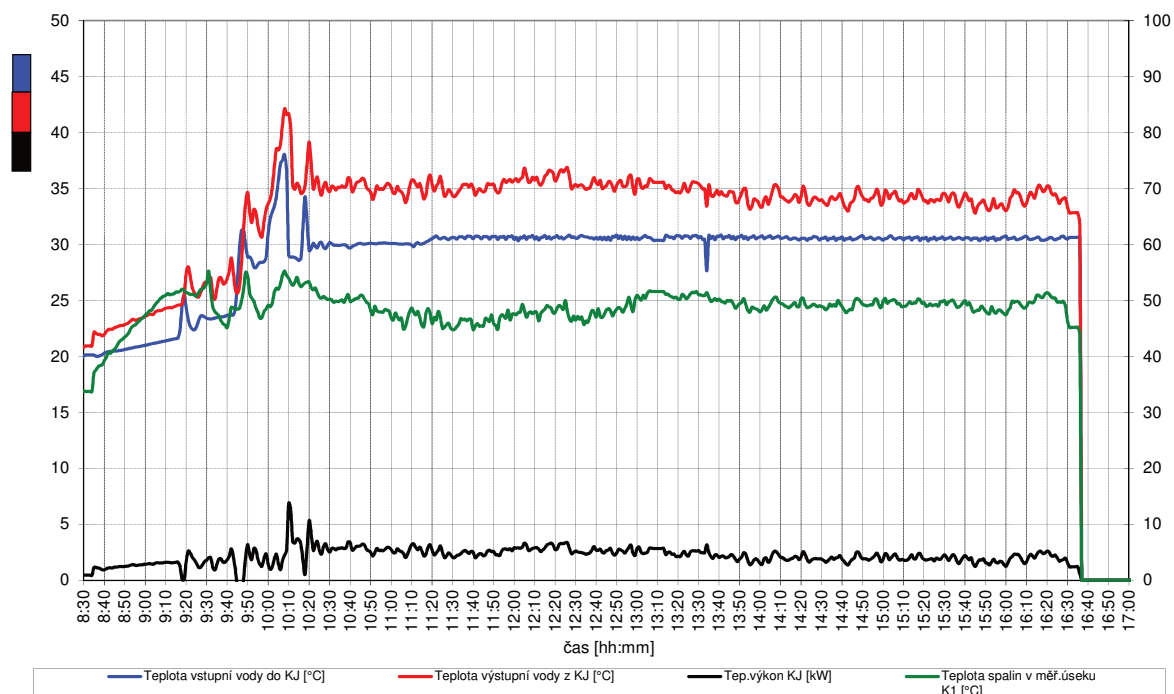
8.4 Zkoušky kotle v konfiguraci KJ2 a H3

Na základě výsledků měření se zdá, že palivo padá na rovinu roštu hořáku H2 stále ještě příliš vlhké. To je pravděpodobně způsobeno vysušováním pouze konvekčním způsobem – palivo prochází ohřátým nátrubkem. Z předchozích zkoušek vyšlo také najevo, že hořák s komínkem nemá dostatečnou plochu hořáku pro vyšší jmenovitý výkon. Hořák byl tedy upraven na tzv. „korunkový“, díky čemuž docházelo k intenzivnějšímu prosušování paliva (jak konvekčně, tak radiačně) a zároveň byly tyto prořezy použity jako dodatečná plocha hořáku, na níž probíhá spalování předsušeného paliva. Tím bylo možné zvýšit plochu hořícího paliva (tzv. reakční povrch), potažmo jmenovitý výkon a zlepšit předsušení i při sníženém výkonu. Se zmenšujícím se reakčním povrchem paliva se prodlužuje délka hoření [15], což je v případě kontinuálního dodávání paliva nevýhodou. Pro kontinuální dodávku paliva je nejvhodnější, aby palivo shořelo za co nejkratší dobu a nespálené palivo se na roštu

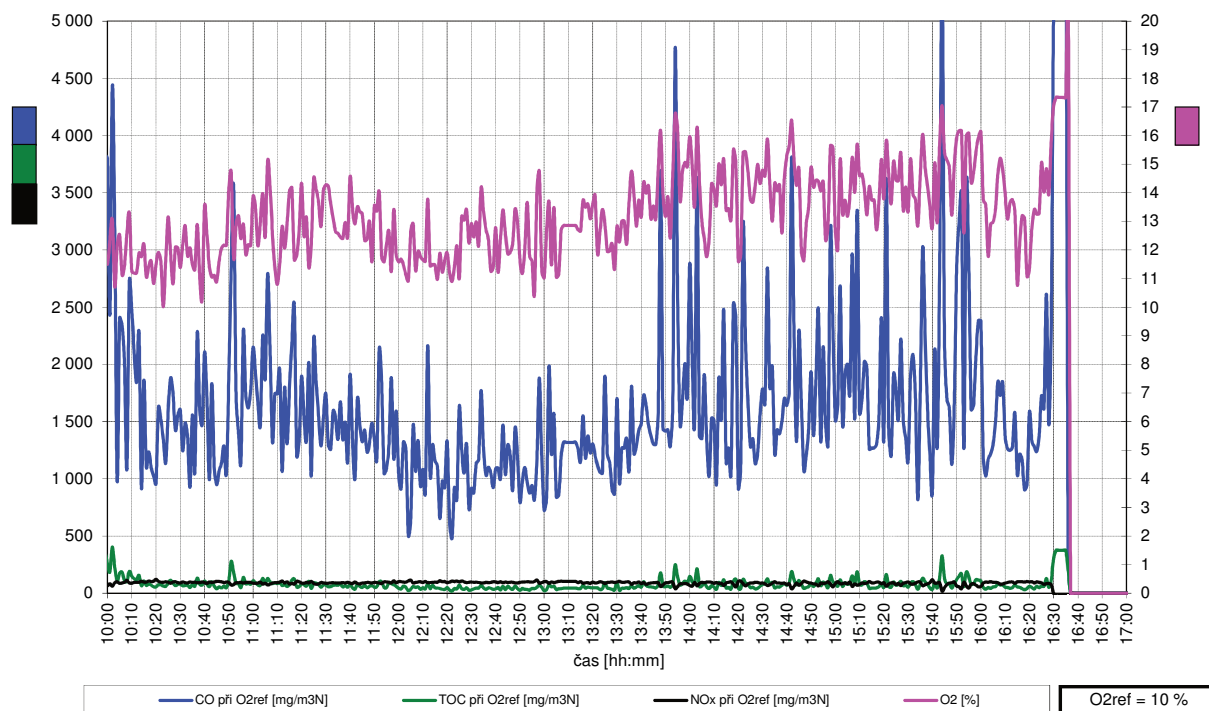
nehromadilo. Výsledkem je nárůst emisí znečišťujících látek ve spalinách. Výsledky této optimalizace jsou patrné z Obr. 28, Obr. 29, Obr. 30.



Obr. 28 – Graf průběhů výkonu kotle a teplot vody ze dne 27. 2. 2014



Obr. 29 – Graf průběhů výkonu kondenzační jednotky, teplot vody a teploty spalin za kondenzační jednotkou ze dne 27. 2. 2014



Obr. 30 – Emise CO a NO_x přepočtené na referenční O_{2,REF}=10 %, KONCENTRACE O₂ ze dne 27. 2. 2014

pozn.: Z tohoto grafu vyplývá, že se i při sníženém výkonu při uzavření části přívodů primárního spalovacího vzduchu podařilo docílit optimálního přebytku spalovacího vzduchu, organické uhlovodíky a oxidy dusíku se drží na průměrné úrovni a emise CO se pohybují na úrovni cca 1500 mg/m³_N při měřeném kyslíku.

Těchto výsledků bylo dosaženo při sníženém výkonu po úpravě přívodu primárního spalovacího vzduchu. Bylo zjištěno, že při sníženém výkonu je třeba přívod primárního vzduchu regulovat nejen ventilátorem, ale také uzavřením částí přívodních otvorů na desce primárního přívodu vzduchu. Z tohoto důvodu by měla být přívodní deska (rošt) vybavena uzavíracími prvky. Palivo bylo použito ze zdroje MM Holz.

Jak probíhá hoření na korunkovém hořáku je patrné z Obr. 31. Výsledky měření kotle v této konfiguraci (včetně vypočtené účinnosti kotle a soustavy kotle a kondenzační jednotky) jsou uvedeny v kapitole 8.5 v tabulce Tab. 13.



Obr. 31 – Průběh hoření na korunkovém hořáku ze dne 27. 2. 2014

pozn.: Z obrázku je patrné, že dřevní štěpka procházející korunkou je ohřívána hořícím palivem na roštu a prosušuje se. Na povrchu přiváděného paliva již dochází k zápalu paliva a na rovinu roštu přepadává již hořící předsušené palivo. Průřezy v komínku (korunka) umožnily rychlejší prosušení paliva. Na obvodu korunkového hořáku je vidět sekundární hořák, který při sníženém výkonu plní roli přívodu sekundárního vzduchu pod deflektor.

8.5 Sumarizace zkoušek

Průběhy všech měření jsou zpracovány v samostatných interních zprávách VEC.

- Zpráva č. 5/13 – měření ze dne 23. 10. 2012
- Zpráva č. 20/13 – měření ze dne 20. 3. 2013
- Zpráva č. 33/13 – měření ze dne 25. 4. 2013
- Zpráva č. 46/13 – měření ze dne 6. 6. 2013
- Zpráva č. 47/13 – měření ze dne 7. 6. 2013
- Zpráva č. 48/13 – měření ze dne 10. 6. 2013
- Zpráva č. 49/13 – měření ze dne 23-24. 7. 2013
- Zpráva č. 50/13 – měření ze dne 8. 8. 2013
- Zpráva č. 82/13 – měření ze dne 15. 8. 2013
- Zpráva č. 88/13 – měření ze dne 5. 9., 10. 9., 27. 9. 2013
- Zpráva č. 89/13 – měření ze dne 27. 11. 2013
- Zpráva č. 63/14 – měření ze dne 27. 1. 2014
- Zpráva č. 64/14 – měření ze dne 20. 2., 27. 2. 2014

Ze všech provedených měření (viz Tab. 11) byly vybrány 2 režimy, při kterých bylo dosaženo nejlepších výsledků účinnosti při spalování vlhké dřevní štěpky (cca 40 % hm. a více) při akceptovatelných emisích znečišťujících látek ve spalinách – především tuhých znečišťujících látek (TZL nebo také prach). Tučně je znázorněno nastavení při daném režimu.

Tab. 11 – Vybrané výsledky provedených zkoušek na všech typech primárních hořáků a obou typech kondenzačních jednotek

Datum měření	Vlhkost paliva	Účinnost sestavy	Účinnost kotle	Výkon kotle [kW]	Výkon jednotky [kW]	Konfigurace	Poznámka
23.10.2012	cca 40%	-	-	45 až 50	4 až 5	-	-
20.3.2013	28%	98%	91%	54,51	4,47	KJ1 + H1	jmenovitý výkon, jednotka chlazená na 30 °C
25.4.2013	45%	96%	90%	60,49	4,44	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
6.6.2013	44%	96%	90%	60,63	4,55	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
7.6.2013	39%	-	90%	63,91	-	KJ1 + H1	nechlazená kondenzační jednotka
10.6.2013	42%	-	90%	64,47	-	KJ1 + H1	bez kondenzační jednotky
23.7.2013	33%	-	91%	63,5	-	KJ1 + H1	nechlazená kondenzační jednotka
24.7.2013	33%	-	92%	59,1	-	KJ1 + H1	nechlazená kondenzační jednotka
8.8.2013	50%	95%	88%	58,92	4,29	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
15.8.2013	48%	98%	90%	50,72	4,58	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
5.9.2013	48%	96%	89%	20,6	1,4	KJ1 + H2	snížený výkon
10.9.2013	42%	96%	85%	20,61	1,44	KJ1 + H2	snížený výkon
27.9.2013	29%	99%	94%	22,99	1,21	KJ1 + H2	snížený výkon, nízká vlhkost dřevní štěrpy
27.11.2013	48%	96%	87%	75,11	7,9	KJ2 + H2	jmenovitý výkon
27.1.2014	cca 35%	96%	90%	50,89	3,55	KJ2 + H2	jmenovitý výkon, vlhkost paliva neměřena
20.2.2014	48%	98%	90%	23,64	1,96	KJ2 + H2	snížený výkon
27.2.2014	39%	99%	91%	29,38	2,63	KJ2 + H3	snížený výkon

pozn.: Měření ze dne 23. 10. 2012 není v této tabulce hodnoceno, neboť nejsou dostupná původní data

Zkouška ze dne 15. 8. 2013:

7:47 – spuštění kotle-automatické zapalování.

7:53 – zapálení. Vývin bílého kouře.

8:10 – teplota spalín 72 °C. Proces zapalování není ukončen.

8:25 – normální provoz. Příkládací cyklus 11/16 s. Požadavek lambda s. 10,5 %

8:30 – změna příkládání 13/16 s.

8:47 – zpozorována kondenzace v komínové soustavě za KJ a před hl. odtahovým ventilátorem.

8:48 – čištění turbulátorů

9:17 – změna příkládání 14/16 s.

9:39- změna požadavku řízení lambda s. 11,5 %.

9:46 – změna příkládání 13/16 s.

9:54 – odpuštěn kondenzát z přepadu. V kondenzátu tmavé barvy plavou uhlíky. Vstupní teplota KJ je 47 °C.

10:10 – změna příkládání 12/16 s.

11:05 – upuštěn kondenzát 3,324 kg brutto. Kyblík 350 g.

12:05 – hodinový odběr kondenzátu 4,639 kg brutto.

12:23 – změna požadavku řízení lambda s. 12,5%.

13:12 – hodinový odběr kondenzátu 4,524 kg brutto.

13:27 – doplnění paliva do zásobníku.

13:32 – požadavek lambda s. 10 %. Změna poměru prim./sek. na 1,5

13:58 – čištění tabulátorů.

14:03 – měření TZL (odběr 30 minut)

14:12 – odběr kondenzátu 4,495 kg brutto.

15:03 – nastavení lambda řízení: min. prim. 15 %, min. sek. 20 %, prim. / sek. 1,5
dělitel 1,8.

15:10 odběr kondenzátu 4,925 kg brutto.

15,13 odstávka kotle.

Zkouška ze dne 27. 2. 2014:

8:05 – plnění + zápal – tah 25 Pa,

8:17 – palivo zapáleno

8:26 – snížen tah na 15 Pa

9:00 - Na části hořáku utěsněné přívody primárního spalovacího vzduchu

9:40 – opětovné zapálení paliva

9:55 – příkládací cyklus 7/25 s

10:45 – příkládací cyklus 6/25 s – výkon 30 kW – měření prachu

13:00 - odběr kondenzátu z kondenzační jednotky 1,32 kg

13:33 – příkládací cyklus 5/24 s – snížen výkon na 25 kW

14:05 - odběr kondenzátu z kondenzační jednotky po hodině 1,4 kg

15:05 - odběr kondenzátu z kondenzační jednotky po hodině 1,7 kg, příkládací cyklus 2/10 s

16:00 – příkládací cyklus 2/9 s – výkon cca 20 kW

16:05 - odběr kondenzátu z kondenzační jednotky po hodině 1,5 kg, příkládací cyklus 2/10 s

Tab. 12 – Naměřené a vypočtené hodnoty, režim 2 – jmenovitý výkon ze dne 15. 8. 2013

Číslo režimu		2	
Datum měření		15.8.2013	
Čas počátku měření	h:min	13:50	
Čas konce měření	h:min	14:50	
Délka zkoušky	h	1,0	
Atmosférický tlak	mbar	993	
Teplota vzduchu	°C	25,8	
Relativní vlhkost vzduchu	%	24,8	
Palivo		Štepka BIOCEL	
Vlhkost paliva	%	48,2	
Měřený výkon kotle	kW	50,7	
Teplota výstupní otopné vody	°C	75,4	
Teplota vstupní otopné vody	°C	60,6	
Měřený výkon kondenzační jednotky	kW	4,6	
Teplota výstupní vody z kondenzační jednotky	°C	38,2	
Teplota vstupní vody do kondenzační jednotky	°C	34,3	
Nepřímá účinnost kotle	%	89,8	
Celková účinnost zařízení (nepřímou metodou)	%	97,9	
Teplota spalin	°C	103	
Tah komína	Pa	16,3	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	%obj.	11,3	
Přebytek vzduchu	-	2,16	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	651
	NO _x	mg/m ³ _N	131
	TOC	mg/m ³ _N	40
	TZL	mg/m ³ _N	9
	CO ₂	g/m ³ _N	195

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

Jak vyplývá z Tab. 12 a Tab. 13, kotel splňuje požadavky na vývin emisí znečišťujících látek jak dle sbírky zákonů č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [12], tak také limitní koncentrace emisí prachu dle požadavků na ekodesign kotlů na tuhá paliva [40].

Tab. 13 – Naměřené a vypočtené hodnoty, režim 1 – jmenovitý výkon ze dne 27. 2. 2014

Číslo režimu			1
Datum měření			27.2.2014
Čas počátku měření		h:min	11:00
Čas konce měření		h:min	13:30
Délka zkoušky		h	2,5
Atmosférický tlak		mbar	988
Teplota vzduchu		°C	20,4
Relativní vlhkost vzduchu		%	29,7
Palivo			Štěpka MM Holz
Vlhkost paliva		%	38,5
Měřený výkon kotle		kW	29,4
Teplota výstupní otopné vody		°C	80,4
Teplota vstupní otopné vody		°C	64,3
Měřený výkon kondenzační jednotky		kW	2,6
Teplota výstupní vody z kondenzační jednotky		°C	35,3
Teplota vstupní vody do kondenzační jednotky		°C	30,5
Nepřímá účinnost kotle		%	91,3
Celková účinnost zařízení (nepřímou metodou)		%	99,4
Teplota spalin		°C	48
Tah komína		Pa	26,2
Koncentrace O ₂ v suchých spalínách		% _{obj.}	12,6
Přebytek vzduchu		-	2,49
Koncentrace plynných emisí v suchých spalínách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	1 321
	NO _x	mg/m ³ _N	94
	TOC	mg/m ³ _N	56
	TZL	mg/m ³ _N	20
	CO ₂	g/m ³ _N	203

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

Dalším zajímavým zjištěním je stupeň kondenzace v kondenzační jednotce. V kondenzační jednotce zkondenzuje pouze část vodní páry, obsažené ve spalínách. To je dáno technickými omezeními a také teplotou vody pro chlazení jednotky, která musí splňovat požadavky na minimální teplotu využitelnou v otopné soustavě. Právě množství kondenzované vody je přímo úměrné energii získané z kondenzační jednotky.

V ideálním případě, kdyby zkondenzovala veškerá vodní pára obsažená ve spalínách, by bylo možné dosáhnout ještě vyšší účinnosti (relativní účinnost nebo také normovaný stupeň využití by v tomto případě překročil hranici 100 %). Tato teoretická hodnota kondenzace lze určit množstvím vody, vstupující do spalovací komory (vlhkost spalín je dána jak vodou obsaženou v palivu, tak reakcí vodíku a kyslíku při spalování).

Pokud by bylo teoreticky možné nechat zkondenzovat veškerou vodu obsaženou ve spalinách, byli bychom schopni z paliva dostat téměř veškerou energii v něm uloženou – využili bychom tedy téměř celé spalné teplo biomasy. Jako příklad je možné uvést konkrétní palivo o energetické vlhkosti 48,22 % hm. Toto palivo má výhřevnost 7,93 MJ/kg a obsah vodíku v palivu $H_r = 2,93$ % hm. V případě tohoto konkrétního paliva bude množství vody ve spalinách rovno 0,74 kilogramu vody na každý kilogram paliva. Díky znalosti této hodnoty je možné z příkonu kotle a výhřevnosti paliva dopočítat jeho spotřebu a tím také množství vody, které by bylo možné teoreticky nechat zkondenzovat v kondenzační jednotce a uvolnit tak obsažené teplo.

Na základě vzorců (17), (18) a (21) lze určit stupeň kondenzace a potažmo také teoretickou hranici účinnosti celé sestavy při teoretické dokonalé kondenzaci veškeré vody ze spalin. Pro názornost je výpočet stupně kondenzace proveden na datech z měření ze dne 15. 8. 2013 – viz Tab. 12 dle vzorce (18):

$$\dot{m}_{\text{palivo}} = \frac{\frac{P_k}{\eta_k}}{\frac{Q_i^r}{3,6}} \cdot W_t^r = \frac{\frac{50,7}{0,898}}{\frac{7,93}{3,6}} \cdot 0,482 = \underline{\underline{12,35 \text{ kg/h}}}$$

Spalovací komorou tedy projde 12,35 kg vody (dané vlhkostí paliva) za hodinu. K této vodě, obsažené v palivu (volné) je třeba přičíst také vodu, která vzniká reakcí vodíku (H_2) a kyslíku (O_2) v palivu. Množství, resp. hmotnostní tok takto vzniklé vody je vypočítán v následujícím výpočtu dle vzorce (21):

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\frac{P_k}{\eta_k}}{\frac{Q_i^r}{3,6}} \cdot H_t^r \cdot 8,95 = \frac{\frac{50,7}{0,898}}{\frac{7,93}{3,6}} \cdot 0,0293 \cdot 8,95 = \underline{\underline{6,72 \text{ kg/h}}}$$

Celkové množství vody ve spalinách za kotlem při výše zmíněném režimu je tedy 19,07 kg / h. V tomto režimu byl odebrán kondenzát (z přepadu za dobu jedné hodiny) o hmotnosti 4,145 kg. Stupeň kondenzace pro tento režim vychází z výše vypočtených dat a vzorce (17):

$$\eta_{\text{kondenzace}} = \frac{\dot{m}_{\text{kondenzace}}}{(\dot{m}_{\text{palivo}} + \dot{m}_{H_2O})} = \frac{4,145}{(12,35 + 6,72)} = 0,22 \rightarrow \underline{\underline{22\%}}$$

Zjištěný stupeň kondenzace je tedy 23 %. Teoreticky je možné dosáhnout až 100 kondenzace, ale bylo by třeba zvětšit kondenzační jednotku a chladit ji na nižší teplotu.

Voda, která kondenzuje, předává své teplo v kondenzační jednotce. Jak již bylo dříve zmíněno, skupenské teplo kondenzace se pohybuje řádově kolem 2,26 - 2,5 MJ/kg. To při výše zmíněném režimu znamená tepelný výkon 2,6 - 2,88 kW pouze kondenzací. Měřený výkon kondenzační jednotky je v tomto režimu 4,6 kW, což znamená, že více než 1,5 kW výkonu je získáno konvekčně – prouděním horkých spalin kolem výměníku.

V případě teoretické stoprocentní kondenzace (celkové množství vody ve spalinách je 19,07 kg/h) by kondenzační jednotka tedy dosahovala výkon přibližně 11,97 až 13,24 kW v závislosti na teplotě, přičemž s konvekčním teplem by se již nedalo počítat v plné míře a proto je lepší jej zanedbat.

Dosadíme-li tuto teoretickou hodnotu do vzorce (16), dostaneme teoretickou účinnost celé sestavy při výše zmíněném režimu v případě, že by bylo možné nechat zkondenzovat veškerou vodu ve spalinách:

$$\eta_{\text{sestavy}} = \frac{(P_k + P_{\text{kondenzace}}) \cdot \eta_k}{P_k} = \frac{(50,7 + 13,24) \cdot 89,8}{50,7} = \underline{\underline{113,25 \%}}$$

Celková relativní účinnost kotle s kondenzační jednotkou (normovaný stupeň využití) by v tomto teoretickém případě byla zvýšena až na 113,25 % při přepočtu na výhřevnost paliva, což je dáno větším rozdílem mezi výhřevností a spalným teplem u velmi vlhkého paliva.

Vzhledem k požadavkům na ekodesign [39] je třeba se zabývat také účinností ve vztahu ke spalnému teplu. Tuto účinnost je možné odvodit dle vzorce 24. Zjednodušeně lze přepočítat účinnost relativní ve vztahu k výhřevnosti na skutečnou účinnost ve vztahu ke spalnému teplu tak, že relativní účinnost vynásobíme poměrem výhřevnosti ke spalnému teplu.

Přepočty účinnosti sestavy jsou uvedeny v následující tabulce – Tab. 14.

Tab. 14 – Přepočty účinnosti ve vztahu k výhřevnosti a spalnému teplu pro režimy s kondenzační jednotkou

Datum měření	Vlhkost paliva	Účinnost sestavy (na výhřevnost)	Výhřevnost [MJ/kg]	Spalné teplo [MJ/kg]	Účinnost sestavy (na spalné teplo)	Konfigurace	Poznámka
20.3.2013	28%	98%	12,03	13,61	87%	KJ1 + H1	jmenovitý výkon, jednotka chlazená na 30 °C
25.4.2013	45%	96%	8,67	10,45	80%	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
6.6.2013	44%	96%	8,86	10,63	80%	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
8.8.2013	50%	95%	7,57	9,42	76%	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
15.8.2013	48%	98%	7,93	9,76	80%	KJ1 + H1	jmenovitý výkon
5.9.2013	48%	96%	7,77	9,59	77%	KJ1 + H2	snížený výkon
10.9.2013	42%	96%	9,25	11,00	81%	KJ1 + H2	snížený výkon
27.9.2013	29%	99%	11,75	13,35	87%	KJ1 + H2	snížený výkon, nízká vlhkost dřevní štěpky
27.11.2013	48%	96%	7,97	9,80	78%	KJ2 + H2	jmenovitý výkon
27.1.2014	cca 35%	96%	10,58	12,25	83%	KJ2 + H2	jmenovitý výkon, vlhkost paliva neměřena
20.2.2014	48%	98%	7,93	9,76	79%	KJ2 + H2	snížený výkon
27.2.2014	39%	99%	9,88	11,59	85%	KJ2 + H3	snížený výkon

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že požadavek na ekodesign kotlů na tuhá paliva [40] na sezónní účinnost 77 % je u tohoto kotle splnitelný.

9 VARIANTY HYDRAULICKÉHO ZAPOJENÍ KOTLE

Účinnost zařízení jako celku je z energetického hlediska nejdůležitějším parametrem. Nicméně účinnost celého systému vytápění je součinem dílčích účinností jeho jednotlivých součástí, mezi nimiž je kotel sice důležitou, nikoliv však jedinou součástí. V mnoha případech je možné se setkat se špatným návrhem systému vytápění, který měl za následek vysoké provozní náklady [82]. To se týká kondenzační techniky více než jiných zdrojů tepla, protože kondenzační technika má velmi specifické požadavky na teplotu vratné vody.

V první řadě je třeba si uvědomit, že kondenzační technika je specifická v potřebách hydraulického propojení celé sestavy a také v možnostech naplnit potřebu tepla objektů v závislosti na jejich tepelně – technických parametrech a parametrech užívání stavby. Pro správnou funkci jakéhokoliv kondenzačního kotle je nejdůležitější udržení stabilně nízké teploty teplonosného media (ve většině případů vody) ve výměníku kotle. Tato teplota se musí pohybovat pod rosným bodem spalín, přičemž čím nižší je teplota teplonosného media, tím více vody kondenzuje na stěnách výměníku a tím vyšší je předaný výkon ze spalín. Nižší teplota umožňuje využít také větší množství tepla předaného konvekci.

U plynových kondenzačních kotlů spalujících zemní plyn je teplotou rosného bodu teplota přibližně 57 °C (u propanu je teplota rosného bodu 53 °C, u topného oleje přibližně 47 °C) [83]. V případě spalování biomasy záleží na jejím složení, množství vody v ní obsaženém a na kvalitě spalování (resp. ředícím poměru). Voda ve spalínách je tvořena vlhkostí obsaženou v palivu, která se na roštu odpařila a dále vodou, která vznikla interakcí vodíku v palivu s kyslíkem (kyslík je obsažen ve spalovacím vzduchu, ale také v palivu). Z experimentů, které proběhly ve zkušebně výzkumného energetického centra, vyplývá, že optimální teplota vody, která vstupuje do kondenzační jednotky, je 30 °C a méně. Právě hranice 30 °C byla zvolena jako optimální mezi co nejvyšší účinností a technickou využitelností této teploty ve stavebních objektech.

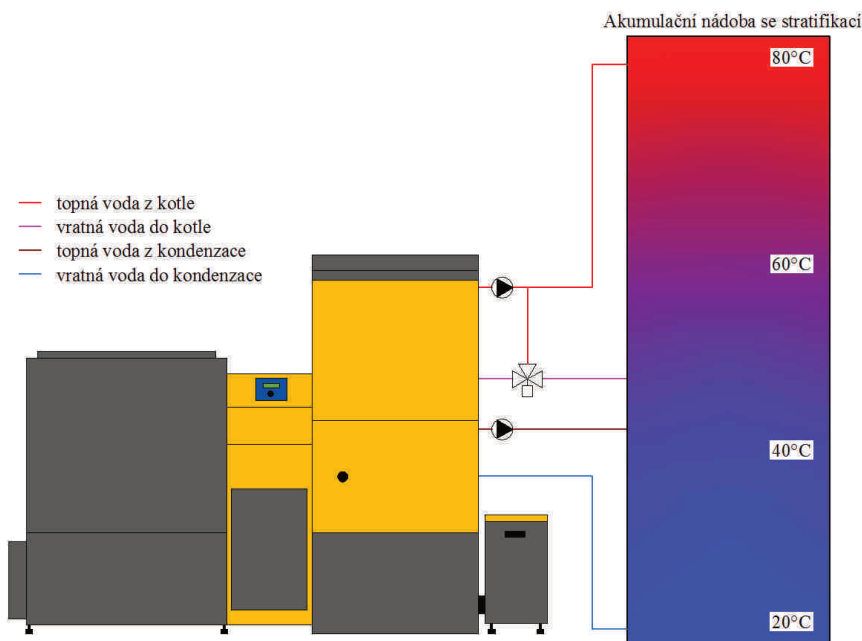
Zásadním specifickým experimentálního automatického kondenzačního kotle na vlhkou biomasu je potřeba využití dvou různých tepelných spádů z kotlového a kondenzačního výměníku. Kotlový výměník má parametry běžné pro kotle na pevná paliva. Běžný teplotní spád je uvažován 80 / 60 °C a kolem ležící teploty. U kondenzačního výměníku je situace komplikovanější, kondenzační výměník totiž dokáže získat ze spalín tím více tepla, čím nižší je teplota vody na vstupu do výměníku. Je tedy nutné najít vhodnou aplikaci pro využití tepla s tímto teplotním spádem. Teplota vstupní vody do kondenzačního výměníku by se měla

pohybovat cca do 30 °C (viz předchozí odstavec). Tento teplotní spád je vhodný především pro velkoplošné otopné plochy, jako jsou podlahové a stěnové vytápění, pro které se jedná o ideální teplotu na vratném potrubí. Jako dalším vhodným využitím se jeví přehřev přívodního vzduchu do objektu. Je tedy možné propojit kondenzační výměník např. s rekuperační vzduchotechnickou jednotkou, ve které může plnit funkci dohřevu vzduchu za výměníkem zpětného získávání tepla.

9.1 Zapojení s akumulací nádobou a podlahovým vytápěním

Akumulační nádoba nebo zapojení více akumulací nádob umožní využít potenciál kondenzační jednotky pro přehřev topné vody a dokonalé vychlazení teplotnosného media před návratem do kondenzační jednotky. Ve chvíli, kdy je akumulací jednotka vychlazená dlouhodobým provozem nízkoteplotního podlahového vytápění, je možnost vychlazení kondenzační jednotky a tudíž účinnost kondenzace nejvyšší. Pokud je použita akumulací nádoba, umožňující stratifikaci topné vody (topná voda o různých teplotách se drží v příslušné výšce – ve spodní části nádoby se drží nejchladnější voda, v horní části nejteplejší), je možné hydraulicky propojit okruh kotle a kondenzační jednotky do jedné akumulací nádoby. Spodní část je v tomto případě napojena na vstup a výstup z kondenzační jednotky a horní část nádoby je napojena na vstup a výstup z kotlového výměníku. Jakmile dojde nahřátí jednotlivých částí nádoby na hranici ekonomické výhodnosti (nádoba již neumožní dostatečně vychladit teplotnosné medium a snižuje se účinnost výměníku kotle a kondenzačního výměníku), provoz kotle se utlumí nebo zastaví do doby, než systém vytápění spotřebuje uloženou tepelnou energii z akumulací nádoby. Zjednodušené schéma zapojení kotle a akumulací nádoby se stratifikací je zobrazeno na Obr. 32.

Výhodou je oddělení okruhu kotle a okruhu systému vytápění, takže kotel může být provozován na jmenovitý výkon s průtokem, který je pro něj optimální, zatímco systém vytápění průtok mění v závislosti na požadavcích vytápěného prostoru. Zásobování systému vytápění topnou vodou by potom příslušelo regulační soustavě se směšováním, která by zajistila vždy aktuálně požadovanou teplotu topné vody na základě požadavku regulace (např. ekvitermní).



Obr. 32 – Zjednodušené schéma zapojení experimentálního kotle se stratifikační nádobou

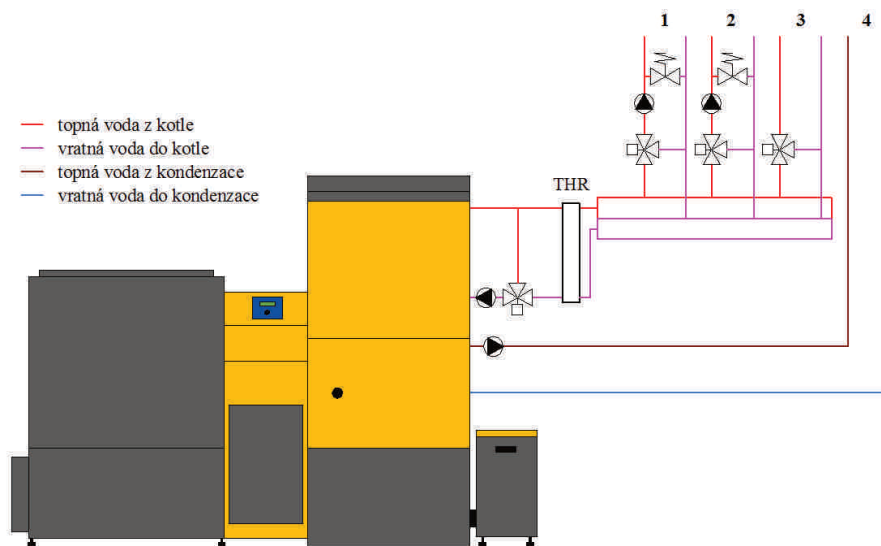
9.2 Zapojení do rozdělovače topných okruhů

Rozdělovač topných okruhů slouží pro rozdělení teplotního média do jednotlivých větví dle jejich požadavků na množství tepla. Primární funkcí rozdělovače je tedy distribuce a řízení tepelných toků do systému vytápění. Rozdělovače se dělí na tlakové a beztlakové. Tlakový rozdělovač má oddělené větve topné a vratné vody, což má za následek rozdíl tlaku v těchto větvích. Rozdíl tlaku je dán rozdílem mezi topnou vodou přitékající do rozdělovače a topnou vodou z rozdělovače odcházející do okruhů vytápění. Aby nedocházelo k rozdílu tlaku, používá se tzv. beztlakový rozdělovač topných okruhů, který je koncipován stejně, ale topná voda je s vratnou propojena zkratem, přes který protéká topná voda rovnou do vratné v případě, že není třeba v systému vytápění. Toto řešení je stále častěji nahrazováno specializovanými rozdělovači s hydraulickým vyrovnávačem dynamických tlaků, který je předřazen před samotný rozdělovač. Toto řešení se dnes využívá v široké škále projektů především s kaskádou kotlů (ať už na pevná, plynná či kapalná paliva).

Obdobně jako při zapojení s akumulací dochází u beztlakového rozdělovače topných okruhů nebo termohydraulického rozdělovače (hydraulického vyrovnávače dynamických tlaků) k oddělení kotlového okruhu od okruhu systému vytápění, což se příznivě projevuje ve vyváženosti soustavy. Zjednodušené schéma zapojení kondenzačního kotle s termohydraulickým rozdělovačem a rozdělovačem topných okruhů je zobrazeno na Obr. 33.

Toto řešení se používá zpravidla ve větších systémech vytápění (bytové domy, administrativní budovy, budovy občanské vybavenosti apod.). Rozdělovač umožňuje nejen řídit toky tepla

do jednotlivých větví, ale také lépe kontrolovat a měřit toto množství. Jedna z větví rozdělovače je zpravidla napojena na akumulární nádobu (případně více nádob).



Obr. 33 – Zjednodušené schéma zapojení experimentálního kotle s termohydraulickým rozdělovačem (THR) a rozdělovačem topných okruhů

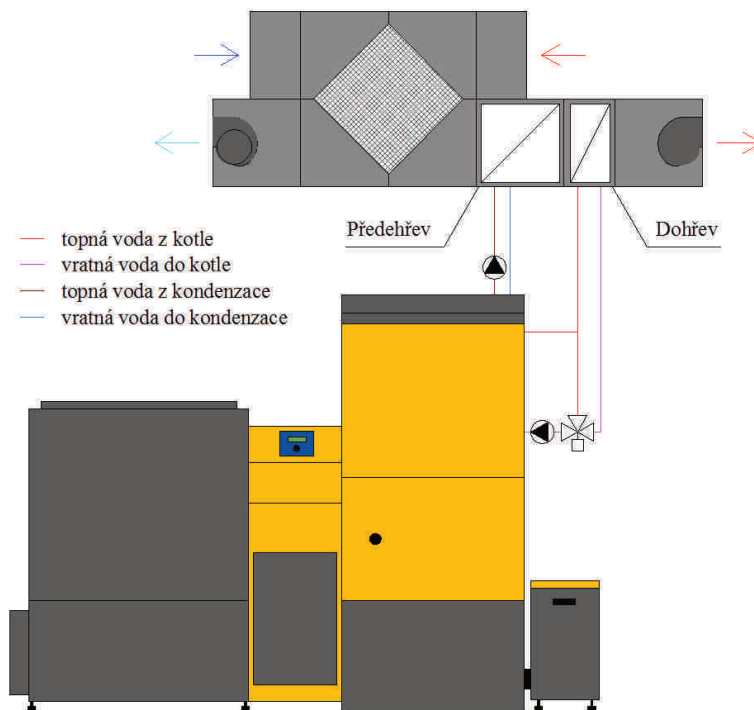
Ačkoliv termohydraulický rozdělovač není vhodný pro kondenzační kotle [84], v případě že kotel a kondenzační jednotka disponují oddělenými okruhy, je možné termohydraulický rozdělovač s výhodou použít u kotlového okruhu a okruh kondenzační jednotky koncipovat tak, aby docházelo k co nejvýraznějšímu vychlazení vratné vody.

Na okruh kondenzační jednotky se nesmí používat ventily pro ohřev vratné vody. Naopak se musí používat tělesa a výměníky s velkým teplotním spádem pro co největší vychlazení vratné vody a tím co nejvyšší využití kondenzace vodní páry ze spalín – nejlépe velkoplošné vytápění nebo přehřev studené vody.

9.3 Propojení se vzduchotechnickou jednotkou

Využití propojení se vzduchotechnickou jednotkou se nabízí především díky nízké teplotě topné vody z kondenzační jednotky. Pro takto nízkou teplotu se v praxi hledá obtížně využití. Právě vzduchotechnická jednotka s rekuperací potřebuje pro dohřev vzduchu za rekuperačním výměníkem dodatečný zdroj tepla. Tímto zdrojem může být jak plynový ohřívač, elektrický ohřívač, tak také vodní výměník, do něhož je možné připojit externí zdroj tepla. Tyto výměníky mohou být sériově zařazeny za sebou, díky čemuž je možné ve vzduchotechnické jednotce využít více teplotních spádů teplotnosných medií. Využití kondenzačního tepla je podmíněno nízkou teplotou na vstupu do kondenzační jednotky, čehož je možné docílit vřazením výměníku propojeného s kondenzační jednotkou přímo za rekuperační výměník. Vzduch, přiváděný přes

rekuperační výměník má běžně teplotu $5\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základě množství přiváděného vzduchu je vzduchotechnická jednotka schopna vychladit teplotnosné medium až k úrovni přibližně $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zjednodušené schéma zapojení kondenzačního kotle a vzduchotechnické rekuperační jednotky je zobrazeno na Obr. 34.



Obr. 34 – Zjednodušené schéma zapojení experimentálního kotle se vzduchotechnickou jednotkou

V případě předehřevu přívodního vzduchu je vhodné použít v okruhu kondenzační jednotky nemrznoucí směs jako prevenci nebezpečí zamrznutí výměníku předehřevu, u kterého je toto riziko již poměrně vysoké. Přebytný výkon kotlového okruhu je třeba ukládat do akumulární nádoby nebo využívat jiným způsobem.

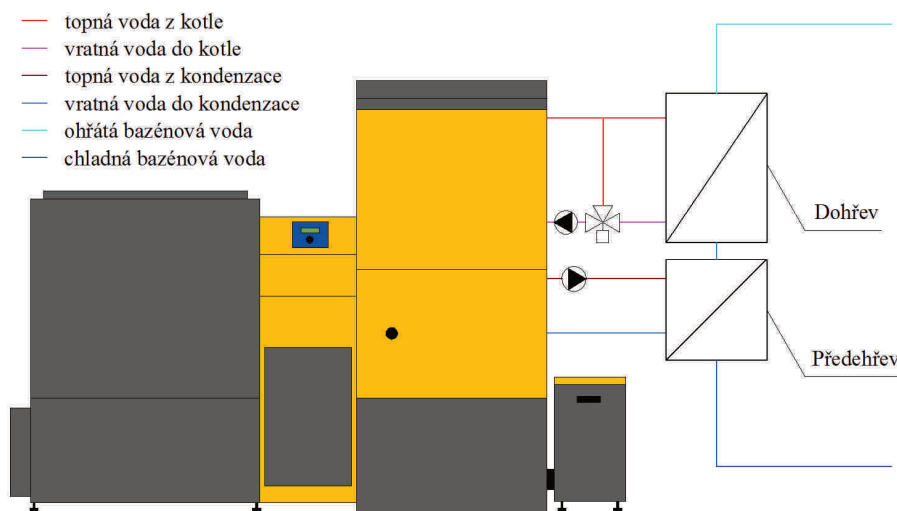
Výhoda akumulární nádoby tkví také v možnosti využití jejího potenciálu v letních měsících ke chlazení přívodního vzduchu ve vzduchotechnické jednotce při využití stejného systému, který je použit pro ohřev. Akumulární nádoba o dostatečné kapacitě lze využít jako vyrovnávací zásobník tepla z přívodního vzduchu v letních měsících.

9.4 Propojení s bazénovým výměníkem

Vytápění objektů bazénů je velmi specifické především tím, že je třeba zajistit jak ohřev bazénové vody, tak ohřev vnitřního vzduchu. Bazény (resp. objekty bazénů) mají předepsanou mimořádně vysokou výměnu vzduchu, která se projevuje na jejich energetické náročnosti. Výměna vzduchu v bazénových objektech je prakticky již výhradně realizována

vzduchotechnickými jednotkami s rekuperací, což energetickou spotřebu významně snižuje. I tak je ale ohřev vzduchu dominantní ve vztahu k ostatním energetickým potřebám.

Kondenzační kotel na vlhkou štěpku by mohl k tomuto účelu v odlehlejších oblastech (bazény na vesnicích, velké horské hotely s wellness centry apod.). Dominantní potřeba tepla by byla pokryta okruhem kotle s vysokou teplotou přívodní vody s možností vyššího vychlazení vratné větve. Naproti tomu ohřev bazénové vody (především v plaveckých bazénech) je možné realizovat otopnou vodou o nižší teplotě a díky předehřevu bazénové vody je možné zpátečku vychladit na velmi nízké teploty vratné vody. První výměník (předehřev) využije maximum z okruhu kondenzace, přičemž dojde k maximálnímu ochlazení vratné vody. Druhý výměník s dostatečným výkonem dohřeje bazénovou vodu na požadovanou teplotu. Zjednodušené schéma zapojení kondenzačního kotle a výměníků pro ohřev bazénové vody je zobrazeno na Obr. 35.



Obr. 35 – Zjednodušené schéma zapojení experimentálního kotle s výměníky pro ohřev bazénové vody

Přebytečný výkon kotlového okruhu je třeba ukládat do akumulární nádoby nebo využívat jiným způsobem.

9.5 Předehřev a ohřev teplé vody

Další možností, jak vychladit vratnou vodu do kondenzační jednotky na co nejnižší úroveň je ohřev teplé vody ve dvou fázích – předehřev studené vody a dohřev na požadovanou teplotu. Toto řešení lze realizovat několika způsoby (průtočný ohřev přes akumulární nádobu se stratifikací, pomocí výměníků řazených sériově – obdobně jako při ohřevu bazénové vody, apod.).

10 EKONOMICKÉ ASPEKTY VYUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍHO KOTLE

Testovaný experimentální automatický kondenzační kotel pro spalování vlhké biomasy je specifický v možnosti spalovat nepředsušenou biomasu. Jde tedy o spalování odpadní biomasy, která není standardně dodávaným palivem. Ekonomická výhodnost tohoto zařízení tkví především v možnosti spalovat tuto odpadní biomasu a tím razantně snížit provozní náročnost kotle. V případě využívání tohoto kotle pro vytápění budov s vazbou na subjekty, které odpadní biomasu zpracovávají je možné spalováním likvidovat nežádoucí odpad z činnosti výše zmíněného subjektu. Mezi tyto subjekty se řadí například technické služby měst, firmy zabývající se zahradnickou činností a prořezy porostů, údržba vodních, silničních a železničních cest a další obdobné subjekty, které při své činnosti kultivují vyšší porosty (stromy a keře) a odpad z těchto porostů štěpkují. V současné době bývá štěrka ponechávána na místě k zetlení, nebo odvážena do specializovaných zařízení, kde se suší pro případné další využití.

Tato část disertační práce ekonomicky porovnává testovaný experimentální automatický kondenzační kotel pro spalování vlhké biomasy s vybranými automatickými kotli na biomasu. V tomto hodnocení byly uvažovány pouze kotle spalující dendromasu. Tímto porovnáním se tak získá pořadí ekonomicky optimální varianty daného kotle.

Hodnocené kotle jsou následující:

- Testovaný experimentální automatický kondenzační kotel pro spalování vlhké biomasy s relativní účinností 99 %.
- Obdobný typ kotle na suchou štěrku, bez využití principu kondenzace vody ze spalín – EGV Multifuel BIO 60kW s relativní účinností 92,5 %.
- Běžný kotel na pelety – EGV Pellet 60 kW s relativní účinností 91-95 %

Mimo toto posouzení stojí kondenzační kotel na pelety – Ökofen Pellematic Condens s relativní účinností 107,3 % o výkonu maximálně 18 kW [54], který není příliš vhodný pro větší aplikace. Vzhledem k jeho ceně (cca 279 tis. bez DPH) a maximálnímu výkonu se o něm v tomto porovnání nedá uvažovat pro kaskádu kotlů.

Jednotlivé kotle jsou hodnoceny podle následujících kritérií:

- Pořizovací cena kotle [Kč]

- Spotřeba za rok vypočtená z ceny paliva pro podniky/bytovou výstavbu, výhřevnosti paliva a účinnosti kotle [Kč] – se zohledněním vlhké štěpky jako odpadní biomasy
- Náklady na údržbu/náhradní díly za rok [Kč]
- Likvidace kondenzátu za rok [Kč] – toto kritérium je aktuální pouze pro kondenzační kotel

Právě likvidace kondenzátu není u kotlů nižších výkonů velkým problémem, protože legislativa v různých částech Evropy nevyžaduje neutralizaci kondenzátu do výkonu kotle 200 kW v případě zajištění rozředění. V České republice je nutné vypouštět do kanalizace jen vody odpovídající požadavkům místního správce kanalizace (zpravidla pH 6,0 – 9,0).

U výše zmíněných kotlů nebudou uvažovány tyto případné dodatečné náklady z těchto důvodů:

- Dotace a daňové odpočty – z důvodu rychle se měnící legislativy nebyly tyto aspekty zahrnuty do kritériálního výběru, protože jsou kotle hodnoceny během doby 15-ti let a tedy není možné predikovat případné daňové změny
- Náklady na obsluhu kotlů a zaměstnance – tyto náklady jsou porovnatelné pro všechny výše zmíněné kotle
- Náklady na elektrickou energii jsou porovnatelné pro všechny výše zmíněné kotle
- Velikost skladovacích prostor pro palivo a samotný kotel jsou porovnatelné pro všechny výše zmíněné kotle
- Náklady na dopravu a instalaci jsou porovnatelné pro všechny výše zmíněné kotle

10.1 Porovnání variant vytápění se stejnými vstupními podmínkami

Porovnávány jsou 4 varianty:

- 1 Experimentální kondenzační kotel spalující běžně dostupnou štěpku – přínosem je pouze vyšší účinnost
- 2 Experimentální kondenzační kotel spalující vlhkou odpadní štěpku – přínosem je jak vyšší účinnost, tak levná a dostupná štěpka (obtížně energeticky využitelná)
- 3 Standardní kotel spalující běžně dostupnou štěpku
- 4 Standardní kotel spalující pelety

Tab. 15 – Výpočet spotřeby paliva jednotlivých variant kotle [85][86][87][88]

Výpočet spotřeby	1	2	3	4
Celková potřeba tepla [Gj/rok]	469,0	469,0	469,0	469,0
Výhřevnost paliva [MJ/kg]	10,0	7,9	10,0	16,5
Účinnost kotle [%]	99,0	99,0	92,5	93,0
Spotřeba paliva [t]	47,4	59,7	50,7	30,6
Jednotková cena paliva [Kč/t]	1 670,0	400,0	1 670,0	5 400,0
Spotřeba kotle [Kč/rok]	79 114,1	23 896,0	84 673,5	165 044,0

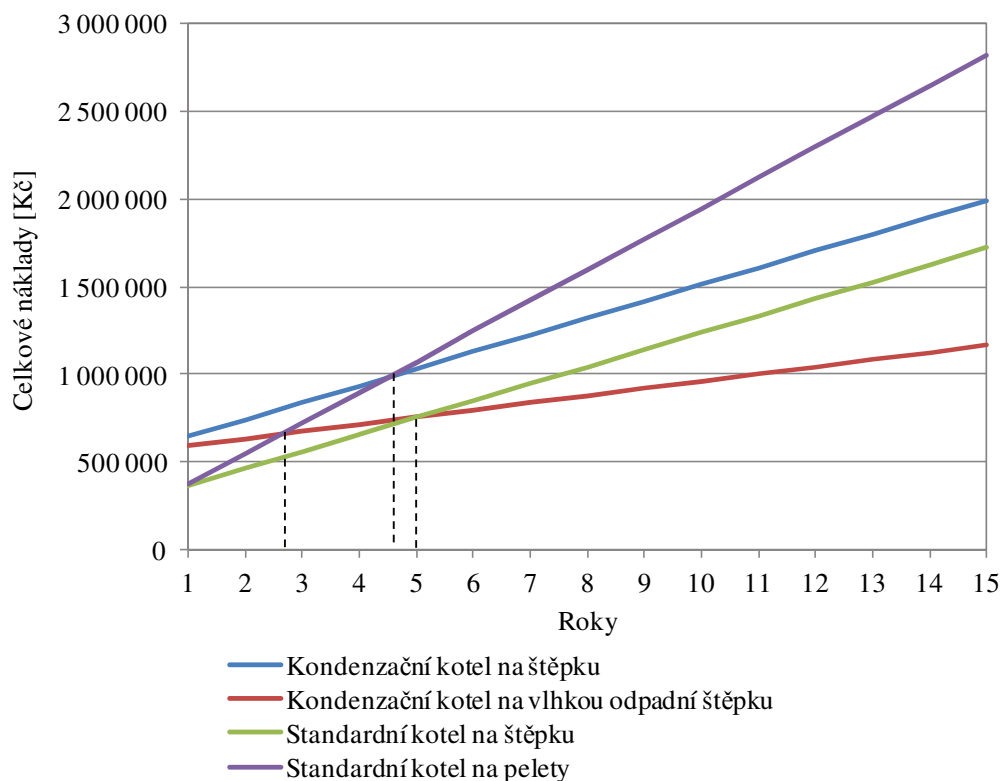
Tab. 16 – Náklady na pořízení a provoz jednotlivých porovnávaných kotlů [88]

Kritérium	1	2	3	4
Pořizovací cena [Kč]	550 000	550 000	270 000	195 000
Spotřeba za rok [Kč]	79 114	23 896	84 674	165 044
Údržba, opravy [Kč]	15 000	15 000	12 000	10 000
Likvidace kondenzátu [Kč]	2 000	2 000	0	0
Celkové náklady za 1.rok [Kč]	646 114	590 896	366 674	370 044
Celkové náklady v dalších letech [Kč]	96 114	40 896	96 674	175 044

Pozn.: Cena kondenzačního kotle na štepku byla odhadnuta výrobcem prototypu pro případ sériové výroby.

Tab. 17 – Celkové kumulované náklady porovnávaných kotlů v letech

Celkové náklady v letech [kč]	1	2	3	4
1	646 114	590 896	366 674	370 044
2	742 228	631 792	463 347	545 088
3	838 342	672 688	560 021	720 132
4	934 457	713 584	656 694	895 176
5	1 030 571	754 480	753 368	1 070 220
6	1 126 685	795 376	850 041	1 245 264
7	1 222 799	836 272	946 715	1 420 308
8	1 318 913	877 168	1 043 388	1 595 352
9	1 415 027	918 064	1 140 062	1 770 396
10	1 511 141	958 960	1 236 735	1 945 440
11	1 607 256	999 856	1 333 409	2 120 484
12	1 703 370	1 040 751	1 430 082	2 295 528
13	1 799 484	1 081 647	1 526 756	2 470 572
14	1 895 598	1 122 543	1 623 429	2 645 616
15	1 991 712	1 163 439	1 720 103	2 820 660



Obr. 36 – Grafické znázornění celkových nákladů v čase

pozn.: Průsečíky jednotlivých variant znázorňují návratnost řešení 1 a 2 vzhledem k řešení 3 a 4. V případě varianty 1 je jasné, že experimentální kotel může díky dostupnosti paliva soupeřit s kotlem na pelety, ale konkurenční kotel pro spalování dřevní štěpky je i přes nižší účinnost stále výhodnější díky poloviční pořizovací ceně. V případě varianty 2, ve které je uvažováno spalování jinak obtížně energeticky využitelné štěpky (podstatně levnější) může toto řešení směle konkurovat jak variantě 4, tak i variantě 3 s relativně krátkou návratností.

10.2 Ekonomické zhodnocení variant

V případě těchto hodnocených variant byla zvolena stejná roční potřeba tepla objektu, která odpovídá ztrátám objektu ve výši 60 kW dle denostupňové metody [85]. Dle výše uvedené ekonomické bilance je patrné, že kondenzační kotel je ekonomicky velmi nákladný, je-li jeho jediným přínosem pouze vyšší účinnost. Vzhledem k faktu, že kondenzační kotel se liší od klasického kotle na štěpku složitější technologií a lze tak očekávat také vyšší náklady na údržbu, nejeví se toto řešení jako konkurenceschopné pro spalování suché štěpky. Přidaná hodnota experimentálního kondenzačního kotle je především v možnosti spalovat méně hodnotnou a energeticky obtížně využitelnou štěpku bez předsušení. Při této variantě je kondenzační kotel konkurenceschopný vzhledem k jiným zařízením již dostupným na trhu.

Lze samozřejmě také očekávat tlak legislativy na zvyšování účinnosti podobně jako u plyných paliv a pravděpodobně také budoucí dotační subvence kondenzační techniky pro spalování tuhých paliv, které kondenzační techniku pro spalování tuhých paliv zvýhodní proti konkurenci.

11 ZÁVĚR

Pokrok v oblasti technologií ve stavebnictví vede ke snižování spotřeby energie budov a omezování celkové emisní stopy budov. Lze tedy očekávat progresivní zvyšování požadavků na snižování energetické náročnosti objektů, které lze dosáhnout jak na straně snížení potřeby tepla, tak také na straně snížení potřeby primárního paliva díky zvyšování účinnosti nebo využívání jiných principů přeměny energie. Již nyní jsme svědky překotných změn požadavků a aktuální legislativa již uvažuje s využitím tzv. primárních energií, které vyznívají příznivě pro biomasu. Je třeba ji ale využívat s co nejvyšší účinností. Jedině zařízení s vysokou účinností a nízkou produkcí emisí je schopné obstát v konkurenci dotovaných zařízení pro vytápění s využitím obnovitelných zdrojů energie, jako jsou tepelná čerpadla apod.

Disertační práce se přednostně zabývá vývojovou fází zařízení pro vytápění objektů biomasou, přičemž klade důraz na zvyšování účinnosti. Největší potenciál pro růst účinnosti je skrytý v kondenzaci vodní páry obsažené ve spalinách. Z tohoto důvodu je blíže rozebrána teorie kondenzace vodní páry a její praktické dopady.

Z této predikce je dále odvozen vývoj kotle a kondenzační jednotky, které byly následně testovány a upravovány na základě aktuálních poznatků až do konečné fáze, která je schopná provozu a plní požadavky zákona č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší [12].

V disertační práci jsou dále prezentovány výsledky ze zkušebních zevrubných praktických ověřovacích testů, které předcházely jednotlivým optimalizačním krokům a které názorně demonstrují technologické možnosti a cestu vývoje zařízení. Tyto výsledky potvrzují výhody, které plynou ze spojení kotle s kondenzační jednotkou a jako takové obsahují široké spektrum zjištění k budoucím výzkumným pracím.

Kondenzační kotel pro spalování tuhých paliv může být jednou z nejúčinnějších alternativ, jak zvýšit účinnost vytápění stavebních objektů biomasou. V porovnání s kotlem pro menší výstavbu Ökofen Pellematic Condens [54], který je v době psaní disertační práce jediným tzv. „malým“ kondenzačním kotlem na tuhá paliva (dřevní pelety) na trhu, má experimentální kondenzační kotel výhodu především v možnosti spalovat méně hodnotné (vlhké) palivo. Výše zmíněný Ökofen Pellematic Condens dokáže spalovat kvalitní dřevní pelety s relativní účinností až 107,3 % (při přepočtu na výhřevnost paliva, při jmenovitém výkonu a v kondenzačním režimu) a jeho výkonové rozpětí se pohybuje od 10 kW do 18 kW jmenovitého výkonu [54], což je jednoznačně nejlepším výsledkem na trhu. Právě tento kotel je řešením s vysokou účinností pro běžné rodinné domy. Jak ale plyne z ekonomické bilance, u

suchého kvalitního paliva je v dnešní době třeba nějaké formy subvence pro tyto zařízení, aby byly ekonomicky zajímavé. Experimentální kotel vyvinutý na zkušebně výzkumného energetického centra cílí především na větší aplikace, ve kterých je možné využít potenciál spalovat vlhké palivo bez nutných úprav, jakými sušení, drcení a peletování dřevní hmoty dozajista jsou. Rozdílné možnosti maximální teoretické účinnosti jsou zde dány právě rozdílem mezi výhřevností a spalným teplem, který roste s vlhkostí paliva – viz Obr. 1.

Dle ekonomické bilance se ukazuje, že je ekonomicky smysluplné se tímto principem v praxi zabývat a bez dostatečných subvencí ze strany státu se zaměřovat především na provozy, ve kterých je štěpka odpadním produktem z jiného procesu a které nedisponují možnostmi sušení, nebo je pro tyto společnosti sušení ekonomicky nevýhodné.

Z hlediska budoucnosti energetiky je třeba se zaměřit na snižování emisí znečišťujících látek v ovzduší. Celkové snížení emisí znečišťujících látek v ovzduší je ale nutné vztahovat na množství paliva a způsob jeho získávání a uvažovat s celkovou emisní stopou celého procesu. V případě spalování vlhkého paliva jsou jisté rezervy v produkci emisí ve srovnání se spalováním suchého kvalitního paliva, ale je třeba si uvědomit energetickou náročnost procesu úpravy surové dřevní hmoty na toto kvalitní a snadno energeticky využitelné palivo. Při spalování suchého kvalitního paliva lze snížit emise znečišťujících látek ve spalinách na minimum a účinnost vzroste také přinejmenším o ztráty plynným nedopalem. Na perspektivnost řešení je proto třeba pohlížet v širším kontextu veškerých souvisejících činností. Na energetiku je třeba nahlížet jak ekonomicky, tak ekologicky a tyto dva pohledy propojit. V energetice je možné pouze udržitelné řešení jak ekologicky, tak ekonomicky – je třeba toto řešení posuzovat na základě ekologické ekonomie (ekonomie životního prostředí).

V době zpracovávání disertační práce neexistoval normou stanovený postup pro měření kondenzačního kotle na tuhá paliva a nebylo možné aplikovat standardní postupy. Z tohoto důvodu jsou veškerá měření prováděna na základě norem a metodik s úpravami pro tento specifický systém vytápění. Vzorce pro zohlednění vlivu kondenzační jednotky jsou převážně odvozené ze vzorců pro kvantifikaci chování kotlů v topném systému, popřípadě při zapojení do normovaných měřících smyček.

Cílem disertační práce bylo posunout znalosti a poznání v tomto oboru vpřed, využít všech znalostí nabytých při dosavadním studiu a co nejlépe získané vědomosti uplatnit. Tato práce poskytuje základ pro další vývoj a uplatnění podobných zařízení na stejném nebo obdobném principu.

Přínosy pro praxi

Z rozborů je zřejmé, že kotel je schopen provozu při dodržení legislativních limitů. Může být tedy v praxi využíván pro vytápění širokého spektra objektů. Největší smysl bude mít v objektech s dobrou návazností na dodávky vlhkého dřevního materiálu jako paliva. V těchto objektech vyváží nízká provozní náročnost vysokou náročností investiční.

Disertační práce shrnuje výsledky získané během tříletého vývoje, které si kladou za cíl být přínosem k prohloubení stávajících znalostí v oblasti spalování pevných a méně hodnotných paliv, v němž autor spatřuje velký potenciál pro budoucí energetiku.

Doporučení pro další postup ve výzkumu

Výzvou pro budoucí výzkum je ověření obdobného zařízení v reálném provozu. Ačkoliv kondenzát při zkouškách nevykazuje parametry, které potenciálně znemožní práci výměníku, je třeba toto v praxi ještě ověřit a případně navrhnout vhodné opatření. Tak jako každé řešení, i toto řešení je třeba technologicky překonat a posunout možnosti spalování tuhých paliv tak daleko, jak to jen půjde.

12 SUMMARY

Boiler with condensing unit for burning solid fuels could be one of the most effective alternatives to increase the heating efficiency of buildings by biomass. The experimental boiler developed by the Energy Research Centre is mainly focused on larger applications in which it is possible to exploit the potential of wet fuel burning without the necessary adjustments, such as drying, crushing and pelletization of wooden material. Different options of maximal theoretical efficiency are being given by the difference between the net calorific value and gross calorific value that grows with fuel moisture – see picture one. Based on the economic analysis, it is economically meaningful to deal with this principle in practice and without sufficient subsidies from the state to focus primarily on the business, in which the wooden chips are a waste product of another process and which do not have the possibilities of drying or drying is economically disadvantageous for those companies.

With respect to the future of energetic, it is necessary to focus on reducing emissions of air pollutants. Total reduction in emissions of air pollutants should be however related to the fuel amount and the method of its obtaining and also considering the general emission footprint of the entire process. In the case of the moist fuels combustion, some reserves are in emissions production compared to dry fuel quality combustion, but it is important to realize the energy intensity of the treatment process of raw wood on this quality and easily energetically usable fuel. During burning of dry – high grade fuel, emissions of pollutants in the flue gas could be reduced to a minimum and also the efficiency can be increased by at least loss of unburned gas. As such, it is needed to be viewed in perspective on the solution in the broader context of all related activities. It should be seen on energetic by both manners - economically and ecologically, and to link these two views. The only sustainable solution from point of environmentalism and economics should be used - the solution should be assessed on the basis of ecological economics (economics of environmentalism).

Recommendations for further progress in research

The challenge for future research is the verification of a similar facility in real service. Although, during testing condensate did not exhibit the parameters which should potentially make the heat exchanger impossible to work, it is necessary to test it in practice and to propose appropriate arrangements, in case of need. This solution is needed to be technologically exceeded, as every solution, and push the limits of combustion of solid fuels as far as it is possible.

- [1] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. Května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřevládání)
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/91/ES ze dne 16. prosince 2002 o energetické náročnosti budov
- [3] NOSKIEVIČ, P., Vesmír 92, 266, 2013/5
- [4] Materiály obce Hoštětín, dostupné z: <http://www.hostetin.cz/obecni-vytopna/gs-1014>
- [5] Česká republika. Sbírka zákonů č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. Zákon ze dne 31. ledna 2012.
- [6] SALAMEH, Mamdouh G. Can renewable and unconventional energy sources bridge the global energy gap in the 21st century? Applied Energy. 2003, vol. 75, 1-2, s. 33-42. DOI: 10.1016/S0306-2619(03)00016-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261903000163>
- [7] Český statistický úřad. Statistická ročenka České republiky 2014. Praha: Český statistický úřad, 2014. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/statisticka-rocenka-ceske-republiky-2014-n-zi0tqklk5k>
- [8] Česká republika, Ministerstvo zemědělství ČR. Akční plán pro biomasu v ČR na období 2012 – 2020, 97843/2012-MZE-17253
- [9] ROOS, C. J., Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat and Power, NorthWest CHP application center [online] 2008. Dostupné z: <http://northwestchptap.org/nwchpdocs/biomassdryinganddewateringforcleanheatandpower.pdf>
- [10] Materiály společnosti CATFIRE SERVICE & TRADING s.r.o., dostupné z: <http://www.catfire-service.com/cz/reference/>
- [11] ČSN EN 303-5:2013 - Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení
- [12] Česká republika. Sbírka zákonů č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Zákon ze dne 2. května 2012.

- [13] HAVLÍK, J., DLOUHÝ, P., Sušení biomasy pro energetické využití. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy XIV“. VUT v Brně (2013). ISBN 978-80-214-4775-2
- [14] HORÁK, J., KUBESA, P., O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1), Tzb-info [online]. 21. 5. 2012. 2012. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [15] BRANC, M., Studium procesu hoření dřeva. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava, 2010.
- [16] MAREŠ, R., Tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry : podle mezinárodní formulace pro průmyslové výpočty IAPWS-IF97, Plzeň 2008, ISBN: 978-80-7043-680-6
- [17] KÓL, P., Dynamika spalování, publikováno na stránkách Spalovací procesy, dostupné z <http://Spalovaci-procesy.wz.cz/Spaliny.html>, 2011.
- [18] BRENNER, O., CIZNER, J., Korozní problémy při spalování biomasy a komunálního odpadu, MM Průmyslové spektrum 2013/5. 7. 5. 2013 Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-problemy-pri-spalovani-biomasy-a-komunalniho-odpadu.html>
- [19] KOŠKO, M., Emisie vznikajúce pri spaľovaní dreva, Tzb-info [online]. 24. 1. 2011. 2011. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/7093-emisie-vznikajuce-pri-spalovani-dreva>
- [20] EN 303-5:2012 - Heating boilers. Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW. Terminology, requirements, testing and marking
- [21] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., KUBESA, P., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě, Tzb-info [online]. 18. 3. 2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [22] Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken. 2011.
- [23] 1. BImSchV. Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen). 2010.

- [24] MACHÁLEK, P., MACHART, J., Upravená emisní bilance vytápění bytů malými zdroji od roku 2006, Český hydrometeorologický ústav, oddělení emisí a zdrojů, pracoviště Milevsko (2007).
- [25] Katalog hnědého uhlí 2012–2013, Severočeské doly a. s. Chomutov.
- [26] EN 303-5:1999. Heating boilers – Part 5: Heating boilers for solid fuels, hand and automatically stocked, nominal heat output of up to 300 kW – Terminology, requirements, testing and marking
- [27] ČSN EN 12831:2005 – Tepelné soustavy v budovách – Výpočet tepelného výkonu
- [28] ČSN EN 12828 + A1:2014 – Tepelné soustavy v budovách – Navrhování teplovodních otopných soustav
- [29] Česká republika. Vyhláška 194/2007 Sb. kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími a registrujícími dodávku tepelné energie
- [30] Česká republika. Vyhláška 237/2014 Sb. kterou se mění vyhláška č. 194/2007 Sb. kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími a registrujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům
- [31] Česká republika. Vyhláška 269/2015 Sb. o rozúčtování nákladů na vytápění a společnou přípravu teplé vody pro dům
- [32] Česká republika. Zákon 406/2000 Sb. o hospodaření energií a související předpisy
- [33] Usnesení Evropského parlamentu ze dne 5. února 2014 k rámci politik v oblasti klimatu a energetiky do roku 2030 (2013/2135(INI))
- [34] Usnesení Evropského parlamentu ze dne 25. Listopadu 2010 nazvané o směru k nové energetické strategii pro Evropu 2011-2020 (2010/2108(INI))
- [35] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES

- [36] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/29/ES ze dne 23. dubna 2009, kterou se mění směrnice 2003/87/ES s cílem zlepšit a rozšířit systém pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství
- [37] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/31/ES ze dne 23. dubna 2009 o geologickém ukládání oxidu uhličitého a o změně směrnice Rady 85/337/EHS, směrnic Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES, 2001/80/ES, 2004/35/ES, 2006/12/ES a 2008/1/ES a nařízení (ES) č. 1013/2006
- [38] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2012/27/EU ze dne 25. října 2012 o energetické účinnosti, o změně směrnic 2009/125/ES a 2010/30/EU a o zrušení směrnic 2004/8/ES a 2006/32/ES
- [39] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie
- [40] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva, Dostupné z: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2015_193_R_0005
- [41] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., Co musí splnit nový kotel na tuhá paliva po roce 2020? Porovnání emisních požadavků pro kotle do 300 MW. Tzb-info [online]. 29. 6. 2015. 2015. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [42] Metodika VECT 003 – Metodika stanovení účinnosti, VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum
- [43] ČSN 07 0245 - Teplovodní a nízkotlaké parní kotle. Teplovodní kotle do výkonu 50 kW. Technické požadavky. Zkoušení.
- [44] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z., Spalování odpadní biomasy v malých zařízeních. Chemické listy Vol. 108, 2/2014, s. 156-162.
- [45] Metodika VECT 011 - Stanovení emisí prachu pro malé spalovací zařízení – ředící tunel, VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum

- [46] KUBESA, P., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., MARTINÍK, L., Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení, Tzb-info [online]. 4. 2. 2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [47] ČSN EN 13284-1:2002 – Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu – manuální gravimetrická metoda
- [48] HORÁK, J., Ředící tunel; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 001/07-04-2012_PO
- [49] US EPA METHOD 5g – PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel
- [50] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., HOLUBČÍK, M., JELUŠOVÁ, S., MARTINÍK, L., Stanovení účinnosti kotlů, Tzb-info [online]. 21. 4. 2014. 2014. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>
- [51] Výsledky sčítání lidu, domů a bytů 2011. In: [online]. [cit. 2015-10-29]. Dostupné z: <http://vdb.czso.cz/sldbvo/#!/stranka=podle-tematu&tu=30740&th=&v=&vo=null&vseuzemi=null&void=>
- [52] Materiály obce Hoštětín, dostupné z: <http://www.hostetin.cz/obecni-vytopna/gs-1014>
- [53] Materiály společnosti CATFIRE SERVICE & TRADING s.r.o., dostupné z: <http://www.catfire-service.com/cz/reference/>
- [54] Materiály společnosti ÖkoFEN Forschungs- und EntwicklungsgesmbH, dostupné z: <http://www.pelletsheizung.de/>
- [55] DE BEST, C. J. J. M., VAN KEMENADE H. P., BRUNNER T., OBERNBERGER. I., Particulate Emission Reduction in Small-Scale Biomass Combustion Plants by a Condensing Heat Exchanger. Energy. 2008, vol. 22, issue 1, s. 587-597. DOI: 10.1021/ef060435t. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef060435t>
- [56] HEGELE, D., Stirlingův motor a biomasa - přesvědčivá kombinace. Biom.cz [online]. 2009-09-14 [cit. 2015-12-01]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/stirlinguv-motor-a-biomasa-presvedciva-kombinace>>. ISSN: 1801-2655

- [57] Sunmachine: Pellet-BHKW mit Stirlingmotor, BHKW-Prinz.de [online]. 12. 8. 2009. 2009. Dostupné z: <http://www.bhkw-prinz.de/sunmachine-pellet-bhkw-mit-stirlingmotor/141>
- [58] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., LACIOK, V., Ověření funkce a vlivu regulace teploty vratné vody u kotle na tuhá paliva v zapojení s akumulací nádobou; Vytápění, větrání a instalace, 1/2016, str. 252-255, ISSN 1210-1389
- [59] HORÁK, J., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K., Co nejvíce ovlivní tvůj kour?, Tzb-info [online]. 14. 1. 2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9475-co-nejvice-ovlivni-tvuj-kour>
- [60] VALENTA V., VYBÍRAL M., MRÁZEK K., Modernizace tepelných soustav v bytových objektech: sborník doporučených technických řešení; Brno: CTI - Cech topenářů a instalatérů ČR, 1999, 67 s. CTI. ISBN 80-86208-04-4
- [61] MRÁZEK K. a kol., Opravy a obnova technických zařízení budov v panelových bytových domech, Praha: ŠEL ve spolupráci se Stavebně technickým ústavem - Energetika budov a Svazem českých a moravských bytových družstev, 2005, 159 s. ISBN 80-86426-23-8
- [62] Vyhláška č. 193/2007 Sb. kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu.
- [63] Rettig Group Česká s.r.o., Vyměňte stará článková tělesa za nová a ušetříte až 30 % energie, Tzb-info [online]. 30. 6. 2009. 2009. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5754-vymente-stara-clankova-otopna-telesa-za-nova-a-uspore-az-30-energie>
- [64] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., HORÁK, J., KRPEC, K., Automatický kondenzační kotel pro spalování biomasy s vysokou vlhkostí; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum. Česká republika. Užitný vzor CZ 25851 U1. 14. 2. 2013
- [65] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., HORÁK, J., KRPEC, K., Automatický kondenzační kotel pro spalování biomasy s vysokou vlhkostí; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum. Česká republika. Přihláška vynálezu CZ 2013 – 106 A3. 14. 2. 2013
- [66] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Hořák pro spalování vlhké biomasy; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 073/26-09-2013_F

- [67] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Korunkový hořák pro spalování vlhké biomasy; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 076/30-09-2014_F
- [68] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Kondenzační jednotka pro automatický kotel na biomasu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 072/26-09-2013_F
- [69] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Spirálová kondenzační jednotka pro automatický kotel na biomasu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 110/06-12-2013_F
- [70] Metodika hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů (platná pro léta 2013 až 2015), Úřad vlády ČR, Č.j.: 1417/2013-RVV
- [71] Česká republika. Vyhláška č. 477/2012 Sb. o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů
- [72] HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., BRANC, M., STRAKA, F., BURYAN, P., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K., Problematika stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popela. Chemické listy Vol. 107, 6/2013, s. 502-509.
- [73] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., JANÁSEK, P., Potenciál biomasy, druhy, balance a vlastnosti paliv z biomasy. Studie v rámci projektu „Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy“. Ostrava 2006. VŠB-TU Ostrava. ISBN 80-248-1207-X
- [74] BALÁŠ, M., ŠEN, H., Negativní vlivy energetického využití biomasy – emise; Sborník přednášek z konference Energie z biomasy V [online], Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006, Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/199_1_1/
- [75] KASSMAN, H., BÄFVER, L., ÅMAND, L. E., The importance of SO₂ and SO₃ for sulphation of gaseous KCl – An experimental investigation in a biomass fired CFB boiler. Combustion and Flame [online]. 2010, 157(9): 1649-1657 [cit. 2015-11-04]. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.05.012.
- [76] KUBÍČEK, J., Vlastnosti biopaliv ve vztahu k jejich spalování a zplyňování; Sborník přednášek z konference Energie z biomasy I [online], Vysoké učení technické v Brně,

- Fakulta strojního inženýrství, 2003, Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/248_1_1/
- [77] PETŘÍKOVÁ, V., PUNČOCHÁŘ, M.: Biomasa – alternativní palivo z hlediska chemického složení. Biom.cz [online]. 16. 7. 2007. 2007. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-alternativni-palivo-z-hlediska-chemickeho-slozeni>
- [78] Sylaby předmětu Stavba kotlů [online]. České vysoké učení technické, fakulta strojní. [cit: 8. 11. 2015] Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/StK%20pr5\[1\].pdf](http://energetika.cvut.cz/files/StK%20pr5[1].pdf)
- [79] VALIŠ, I., Provádění odvodů kondenzátu z kondenzačních kotlů do kanalizace, Tzb-info [online]. 16. 10. 2006. 2006. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3594-provadeni-odvodu-kondenzatu-z-kondenzacnich-kotlu-do-kanalizace>
- [80] Heinrichs, F.J.- Rickmann, B.- Sondergeld, K.D.- Störrlein, K.H. Gebäude- und Grundstücksentwässerung. Kommentare zu DIN EN 12056, DIN 1986 und DIN EN 1610, DIN-Normen und Technische Regeln. Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [81] SN 592 000 Anlagen für die Lignenschaftentwässerung – Planung und ausführung.
- [82] MATĚJKA, J., Nejčastější chyby projektů vytápění – připojení VZT na soustavu UT, Tzb-info [online]. 23. 6. 2014. 2014. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/11384-nejcastejsi-chyby-projektu-vytapeni-pripojeni-vzt-na-soustavu-ut>
- [83] FUČÍK, Z., Stručná teorie kondenzace u kondenzačních plynových kotlů, Tzb-info [online]. 2. 4. 2004. 2004. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1912-strucna-teorie-kondenzace-u-kondenzacnich-plynovych-kotlu>
- [84] BAŠTA, J., Termohydraulický rozdělovač, Tzb-info [online]. 12. 9. 2000. 2000. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/12499-termohydraulicky-rozdelovac>
- [85] TINTĚRA, L., Denostupně – teorie k výpočetní pomůcce, Tzb-info [online]. 11. 7. 2005. 2005. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2592-denostupne-teorie-k-vypocetni-pomucce>
- [86] Přehled cen pelet, Tzb-info [online]. [cit: 1. 11. 2015] Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/43-prehled-cen-pelet>
- [87] Přehled cen dřevní štěpky, Tzb-info [online]. [cit: 1. 11. 2015] Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/37-prehled-cen-drevni-stepky>
- [88] Přehled cen kotlů EGV [online]. [cit: 1. 11. 2015] Dostupné z: <http://www.votona.cz/>

14 PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Věda a výzkum

Užitný vzor:

- [1] KOLONIČNÝ, J., HORÁK, J., KRPEC, K., MARTINÍK, L., OCHODEK, T., Hořák pro spalování tuhých paliv, VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum. Česká republika. Užitný vzor CZ 28765 U1. 27. 2. 2015

Funkční vzorky:

- [2] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Kondenzační jednotka pro automatický kotel na biomasu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 072/26-09-2013_F
- [3] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Hořák pro spalování vlhké biomasy; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 073/26-09-2013_F
- [4] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., Brikety lisované z listí jírovce; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 084/26-09-2013_F
- [5] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., Brikety lisované z listí ořechu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 085/26-09-2013_F
- [6] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., Brikety lisované z listí javoru; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 086/26-09-2013_F
- [7] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., Brikety lisované z listí jasanu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 087/26-09-2013_F
- [8] MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., Univerzální nosič čidel pro tepelně-technická měření; VŠB-TUO, FAST, Katedra Prostředí staveb a TZB, 106/29-11-2013_F

- [9] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Spirálová kondenzační jednotka pro automatický kotel na biomasu; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 110/06-12-2013_F
- [10] KOPŘIVA, V., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., Inovovaný lokální spotřebič na pevná paliva typ 9100; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 112/06-12-2013_F
- [11] KOPŘIVA, V., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., Ochlazovací panel VSP-9118; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 111/06-12-2013_F
- [12] KOPŘIVA, V., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., Inovovaná spalovací komora pro lokální spotřebič na pevná paliva; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 074/29-09-2014_F
- [13] KOPŘIVA, V., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., Inovovaný lokální spotřebič na pevná paliva typ 9100 V s ohřívačem; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 075/29-09-2014_F
- [14] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., Korunkový hořák pro spalování vlhké biomasy; VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 076/30-09-2014_F

Výpočetní software:

- [15] Spolupráce na vývoji softwaru pro LCC kalkulaci vzduchotechnických jednotek - neveřejný firemní software
- [16] Vývoj softwaru pro výpočet a posouzení individuálně stavěných kachlových kamen – je plánováno zveřejnění online na webových stránkách www.tzb-info.cz

Publikační činnost

Významné publikace:

- [17] HRUBÁ, B., ČERNÍKOVÁ, M., KUČEROVÁ, L., MARTINÍK, L., The importance of Fan Location in the Front Door in Measuring of the Air Permeability by the Blower Door

- Test. Advanced Materials Research Vol. 649, Trans Tech Publication Ltd, 2013, s. 125-128. ISSN 1022-6680 - součástí databáze SCOPUS
- [18] GALAS, O., KOŘÍNEK, R., MICHNOVÁ, L., MARTINÍK, L.,: Problems with formation of caverns in the wells for heat. Advanced Materials Research Vol. 649, Trans Tech Publication Ltd, 2013, s. 199-202. ISSN 1022-6680 - součástí databáze SCOPUS
- [19] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z., Spalování odpadní biomasy v malých zařízeních. Chemické listy Vol. 108, 2/2014, s. 156-162. ISSN 0009-2770 - impakt faktor 0,453 (JCR 2012), WoS:000332515200008
- [20] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KUBESA, P., Evaluation of possible use of foliage as a fuel for small combustion equipment. Advanced Materials Research Vol. 899, Trans Tech Publication Ltd, 2014, s. 218-221. ISSN 1022-6680, ISBN-13:978-3-03835-040-8 - součástí databáze SCOPUS
- [21] KRPEC, K., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KUBESA, P., HOPAN, F., KYSUČAN, Z., KREMER, J., JANKOVSKÁ, Z., Potential Utilization of Catalyst for the Combustion of Wood in Households. Advanced Materials Research Vol. 911, Trans Tech Publication Ltd, 2014, s. 388-392. ISSN 1022-6680, ISBN-13:978-3-03835-066-8 - ústní prezentace na konferenci ICKEM 2014 (Indonésie) - součástí databáze SCOPUS
- [22] DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., HORÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., MARTINÍK, L., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., HOLUBČÍK, M. Emission of nanoparticles during combustion of waste biomass in fireplace. In The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2014 : XIX. International Scientific Conference : 9. 4. - 11. 4. 2014, Nízke Tatry, Slovakia. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 27-32. AIP Conference Proceedings - součástí databáze SCOPUS
- [23] KUBESA, P., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., MALCHO, M. Lump wood combustion process. In The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2014 : XIX. International Scientific Conference : 9. 4. - 11. 4. 2014, Nízke Tatry, Slovakia. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 137-145. AIP Conference Proceedings - součástí databáze SCOPUS
- [24] SKŘÍNSKÁ, M., HORÁK, J., DANIHELKA, P., KRPEC, K., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z., KUBESA, P., MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., SKŘÍNSKÝ,

- J., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., JANDAČKA, J. Aerosols and the methods of determining the characteristics of nanoparticles. In The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2014 : XIX. International Scientific Conference : 9. 4. - 11. 4. 2014, Nízke Tatry, Slovakia. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 211-218. AIP Conference Proceedings - součástí databáze SCOPUS
- [25] DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., Emissions of Nanoparticles from Small Combustion Equipment with Regard to the Combustion Mode and Wood Humidity, Advanced Materials Research Vol. 1041, Trans Tech Publication Ltd, 2014, s. 230-234. ISSN 1022-6680, ISBN-13:978-3-03835-040-8 - součástí databáze SCOPUS
- [26] HORÁK, J., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., TOMŠEJOVÁ, Š., DEJ, M., KUBESA, P., MARTINÍK, L., MODLÍK, M., MACHÁLEK, P., Může jedna vesnice vyprodukovat stejné množství B(a)P jako průměrná koksovna?; Vytápění, větrání, Instalace, 2/2015, str. 105-110, ISSN 1210-1389 - součástí databáze SCOPUS
- [27] KUBESA, P., HORÁK, J., MARTINÍK, L., HOLEŠÍNSKÝ, B., BARTOŠ, I., Stanovení průběhu tepelného výkonu individuálně stavěných kamen; Vytápění, větrání, Instalace, 3/2015, str. 98-101, ISSN 1210-1389 - součástí databáze SCOPUS
- [28] DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., HORÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., MARTINÍK, L., OCHODEK, T., Produkce ultrajemných částic při spalování hnědého uhlí v různých typech kotlů malého výkonu; Vytápění, větrání, Instalace, 5/2015, str. 234-237, ISSN 1210-1389 - součástí databáze SCOPUS
- [29] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P., LACIOK, V., Ověření funkce a vlivu regulace teploty vratné vody u kotle na tuhá paliva v zapojení s akumulací nádobou; Vytápění, větrání a instalace, 1/2016, str. 252-255, ISSN 1210-1389 - součástí databáze SCOPUS

Ostatní publikace:

- [30] MARTINÍK, L., Využití kogenerační jednotky pro ohřev teplé vody a výrobu elektrické energie v panelovém domě P1.13. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 2011, roč. 11, č. 1. Ostrava : VŠB-TUO, 2011, s. 85-92. ISSN 1213-1962.

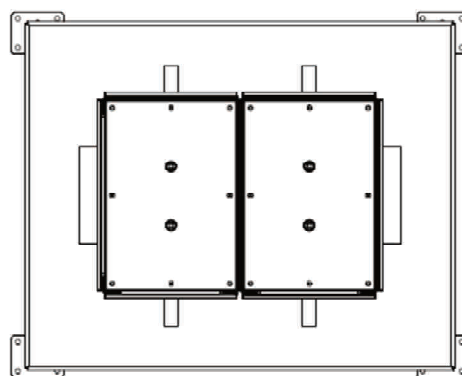
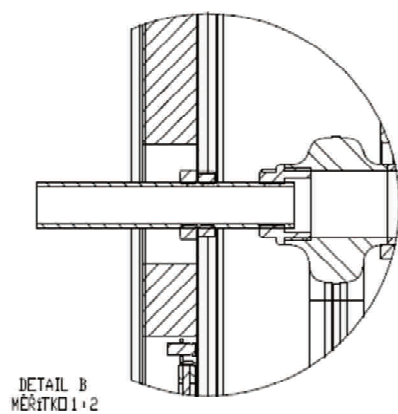
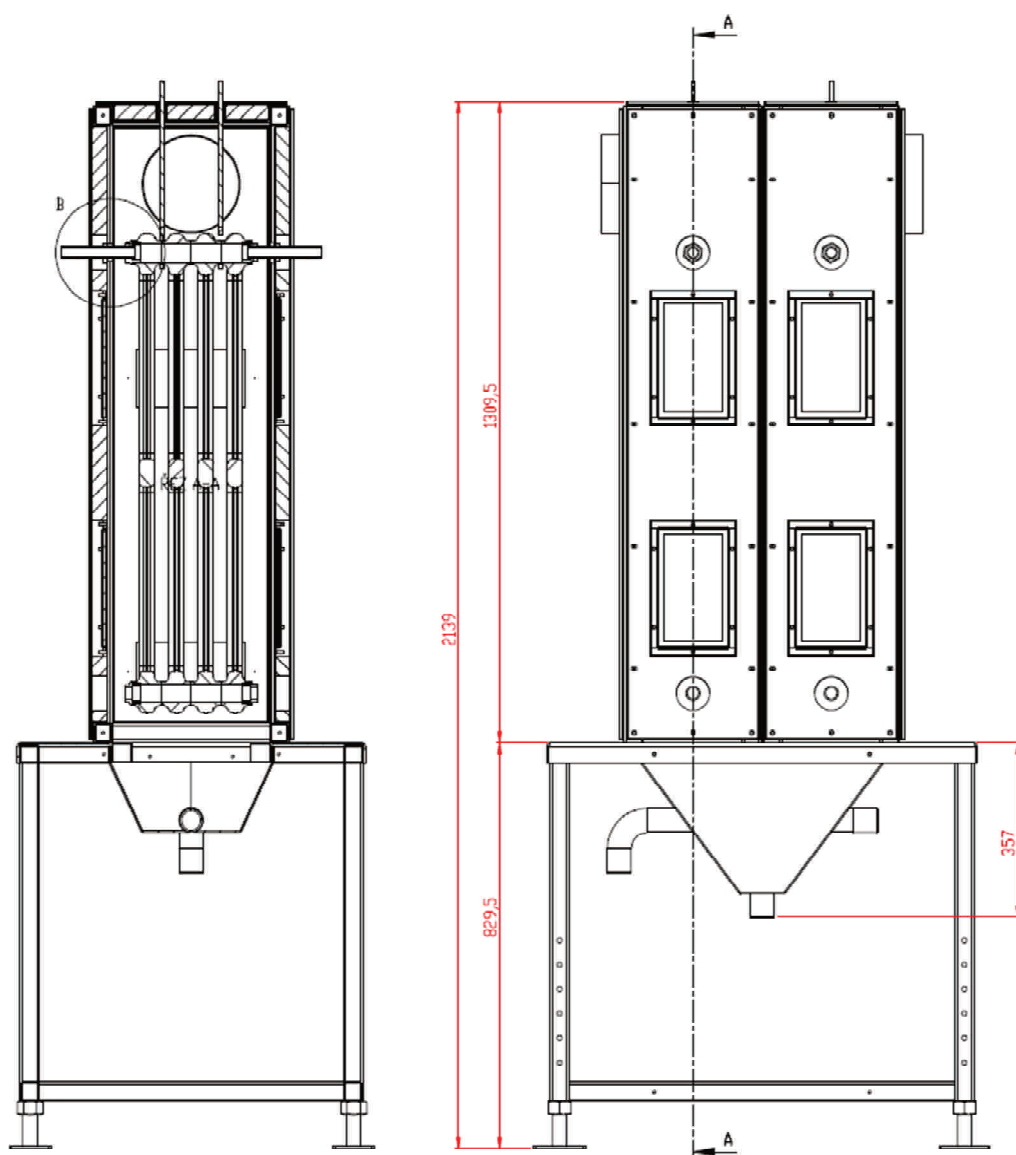
- [31] MARTINÍK L. Systém topení pro rekonstrukci hotelu, STAVITEL 09/2011, s. 14-15, ISSN 1210-4825.,
- [32] ČERNÍKOVÁ, M., LABUDEK, J., MARTINÍK, L. A MICHNOVÁ, L., Solární záření a stabilita interiérů budovy, CzechSTAV 2011. Hradec Králové: MAGNANIMITAS 1. vyd. 2011. ISBN 978-80-904877-5-8, ETTN 040-11-11009-11-1.
- [33] LABUDEK, J., MARTINÍK, L., Aerogel - materiál budoucnosti pro stavební inženýrství. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 2011, roč. 11, č. 2. Ostrava : VŠB-TUO, 2011, s. 297-304. ISSN 1213-1962.
- [34] ČERNÍKOVÁ, M., LABUDEK, J., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., Mikroklima požárního schodiště v závislosti na solárním záření. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 2011, roč. 11, č. 2. Ostrava : VŠB-TUO, 2011, s. 297-304. ISSN 1213-1962.
- [35] LABUDEK, J., MICHNOVÁ, L., MARTINÍK, L., ČERNÍKOVÁ, M., Microclimate depending on solar radiation, GRANT journal č. 01/01, ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4.
- [36] DRDA, M., MARTINÍK, L., Optimalizace návrhu vzduchotechnické jednotky pomocí LCC analýzy. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 2012, roč. 12, č. 1. Ostrava : VŠB-TUO, 2012, s. 177-182. ISSN 1213-1962.
- [37] MICHNOVÁ, L., ČERNÍKOVÁ, M., HRUBÁ, B., MARTINÍK, L., Mikroklima pasivní dřevostavby v závislosti na užívání objektu. CzechSTAV 2012. Hradec Králové: MAGNANIMITAS 3. vyd. 2012. ISBN 978-80-905243-1-6, ETTN 040-12-12015-10-8
- [38] HORÁK, J., KRPEC, K., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., HOPAN, F., KUBESA, P., Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva?, Tzb-info [online]. 19.11.2012. 2012. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [39] GALAS, O., LABUDEK, J., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., SVATOŠOVÁ, I., Akumulace tepla v podzemním zásobníku. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 2012, roč. 12, č. 2. Ostrava : VŠB-TUO, 2012, s. 411-416. ISSN 1213-1962.

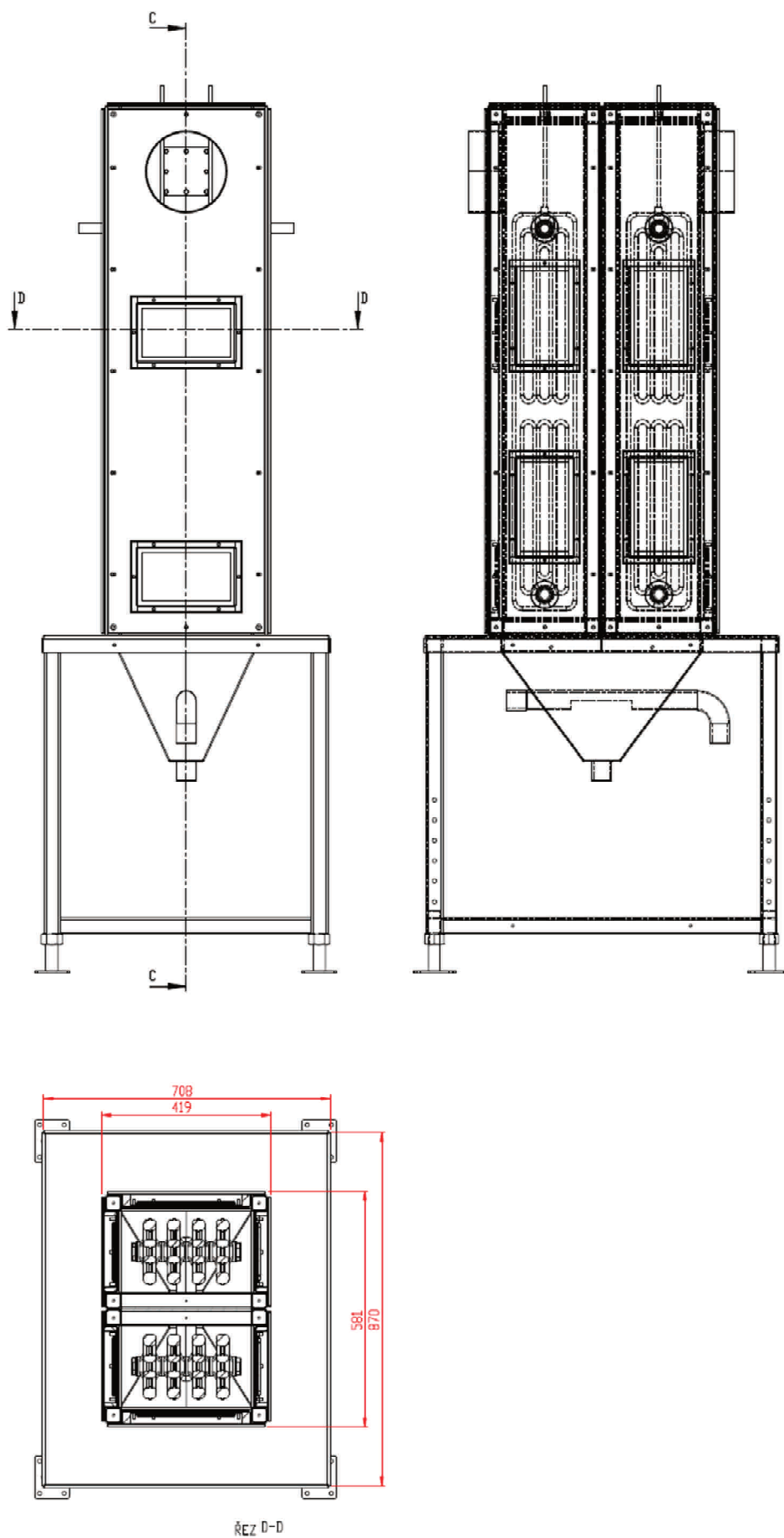
- [40] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., KUBESA, P., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě, Tzb-info [online]. 18.3.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [41] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., Jaké parametry musí splnit kamna, krbové vložky a sporáky? Legislativa v ČR a Evropě, Tzb-info [online]. 3.6.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/9983-jake-parametry-musi-splnit-kamna-krbove-vlozky-a-sporaky-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [42] KUBESA, P., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., MARTINÍK, L., Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení, Tzb info [online]. 4.2.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [43] KRPEC, K., HORÁK, J., MARTINÍK, L., KUBESA, P., HOPAN, F., KYSUČAN, Z., KREMER, J., JANKOVSKÁ, Z., Potenciál využití katalyzátorů při spalování dřeva v domácnostech, Tzb-info [online]. 10.6.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/10022-potencial-vyuziti-katalyzatoru-pri-spalovani-dreva-v-domacnostech>
- [44] KUBESA, P., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., MARTINÍK, L., Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení, Ochrana ovzduší 03/2013, s. 8 - 13, ISSN 1211-0337
- [45] HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K., MARTINÍK, L., KYSUČAN, Z., Praktické zkušenosti s emisemi z malých topenišť, Tzb-info [online]. 19.8.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/10240-prakticke-zkusenosti-s-emisemi-z-malych-topenist>
- [46] DRASTICHOVÁ V., KRPEC K., HOPAN F., MARTINÍK L., HORÁK J., JANKOVSKÁ Z., KUBESA P., Nanoparticles from combustion of waste city biomass, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials , Aix en Provence 2013 (Francie)

- [47] SKOTNICOVÁ I., PANOVEC V., ČERNÍKOVÁ M., KUČEROVÁ L., MARTINÍK L., Influence of thermal bridges in modular constructions on their interior environment and energy intensity, Buildings and environment 2013 - proceedings, Bratislava 2013, s. 269-272, ISBN 978-80-227-4070-8
- [48] HORÁK, J., KRPEC, K., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., HOPAN, F., KUBESA, P., How to determine moisture and heating value of firewood?, MMK 2013 : Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky : [9.-13. prosince 2013, Hradec Králové], s 3722-3728, ISBN:978-80-87952-00-9
- [49] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., What parameters must stoves, inset stoves, and cookers comply with? Legislation in the CR and Europe., MMK 2013 : Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky : [9.-13. prosince 2013, Hradec Králové], s 3729-3739, ISBN:978-80-87952-00-9
- [50] KUBESA, P., HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., MARTINÍK, L., Metodický přístup k testování krbových kamen v ČR a v zahraničí – 1. část, Tzb-info [online]. 23.12.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10723-metodicky-pristup-k-testovani-krbovych-kamen-v-cr-a-v-zahranici-1-cast>
- [51] KUBESA, P., HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., MARTINÍK, L., Metodický přístup k testování krbových kamen v ČR a v zahraničí – 2. část, Tzb-info [online]. 23.12.2013. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10767-metodicky-pristup-k-testovani-krbovych-kamen-v-cr-a-v-zahranici-2-cast>
- [52] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., KYŠUČAN, Z., KREMER, J., Proč sušit dřevo a učit lidi topit? Vliv vlhkosti dřeva a obsluhy na emise znečišťujících látek, Tzb-info [online].10.3.2014. 2013. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/10940-proc-susit-drevo-a-ucit-lidi-topit>
- [53] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., HOLUBČÍK, M., JELUŠOVÁ, S., MARTINÍK, L., Stanovení účinnosti kotlů, Tzb-info [online]. 21.4.2014. 2014. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>
- [54] MARTINÍK, L., HORÁK, J., ŠIMÁČEK, A., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., Zásady návrhu akumulčních

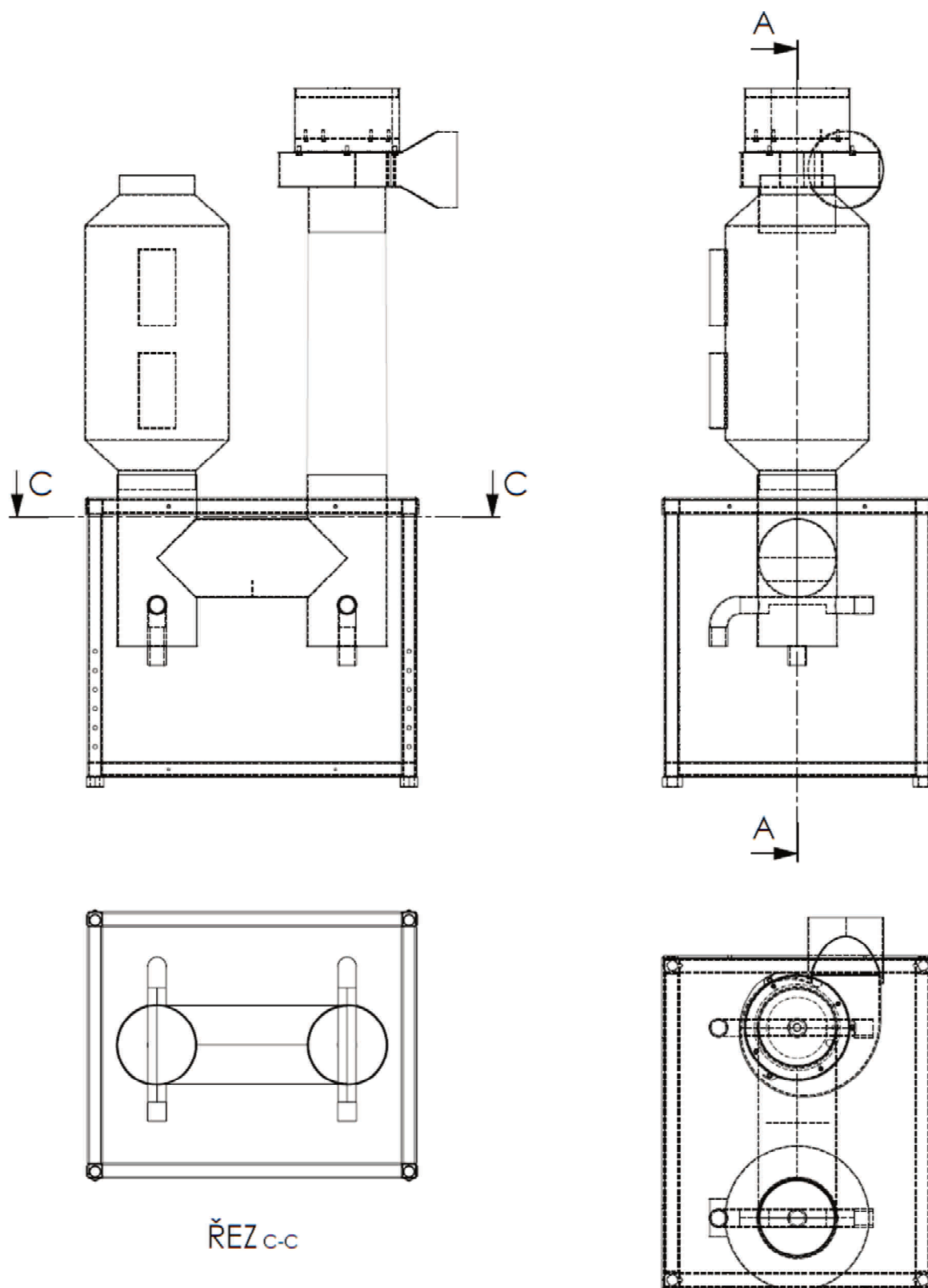
- kamen, Tzb-info [online]. 12.5.2014. 2014. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11203-zasady-navrhu-akumulacnich-kamen>
- [55] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., MARTINÍK, L., DEJ, M., Měření základních fyzikálních veličin potřebných při měření emisí znečišťujících látek – 1. část, Tzb-info [online]. 16.6.2014. 2014. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/11357-mereni-zakladnich-fyzikalnich-velicin-potrebnych-pri-mereni-emisi-znecistujicich-latek-1-cast>
- [56] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., MARTINÍK, L., DEJ, M., Měření základních fyzikálních veličin potřebných při měření emisí znečišťujících látek – 2. část, Tzb-info [online]. 23.6.2014. 2014. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/11388-mereni-zakladnich-fyzikalnich-velicin-potrebnych-pri-mereni-emisi-znecistujicich-latek-2-cast>
- [57] KOLONIČNÝ, J., MARTINÍK, L., KUPKA, D., Automatický kondenzační kotel pro spalování biomasy s vysokou vlhkostí; Tzb-info [online]. 13.7.2015. 2015. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/biomasa/12969-automaticky-kondenzacni-kotel-pro-spalovani-biomasy-s-vysokou-vlhkosti>

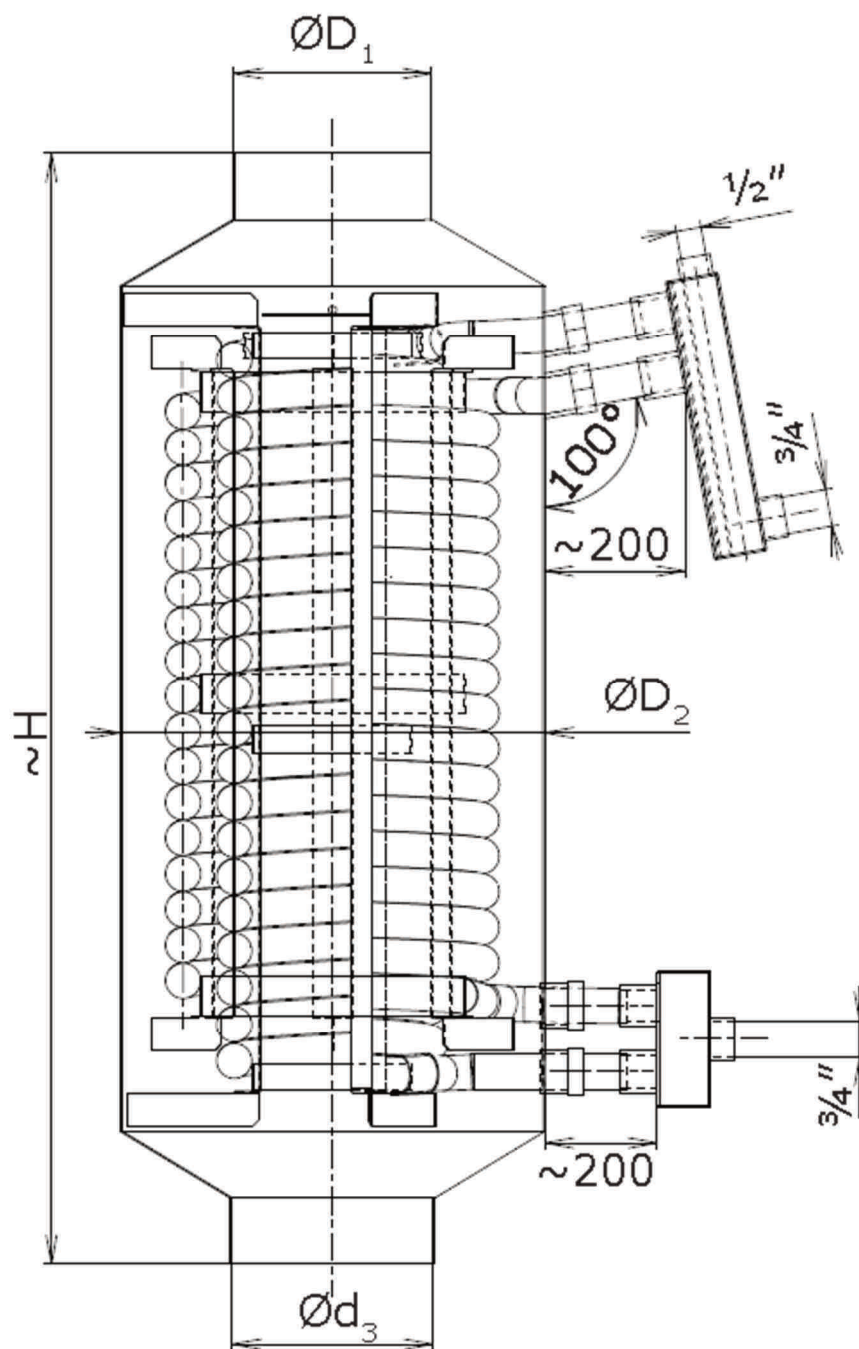
15 PŘÍLOHA 1



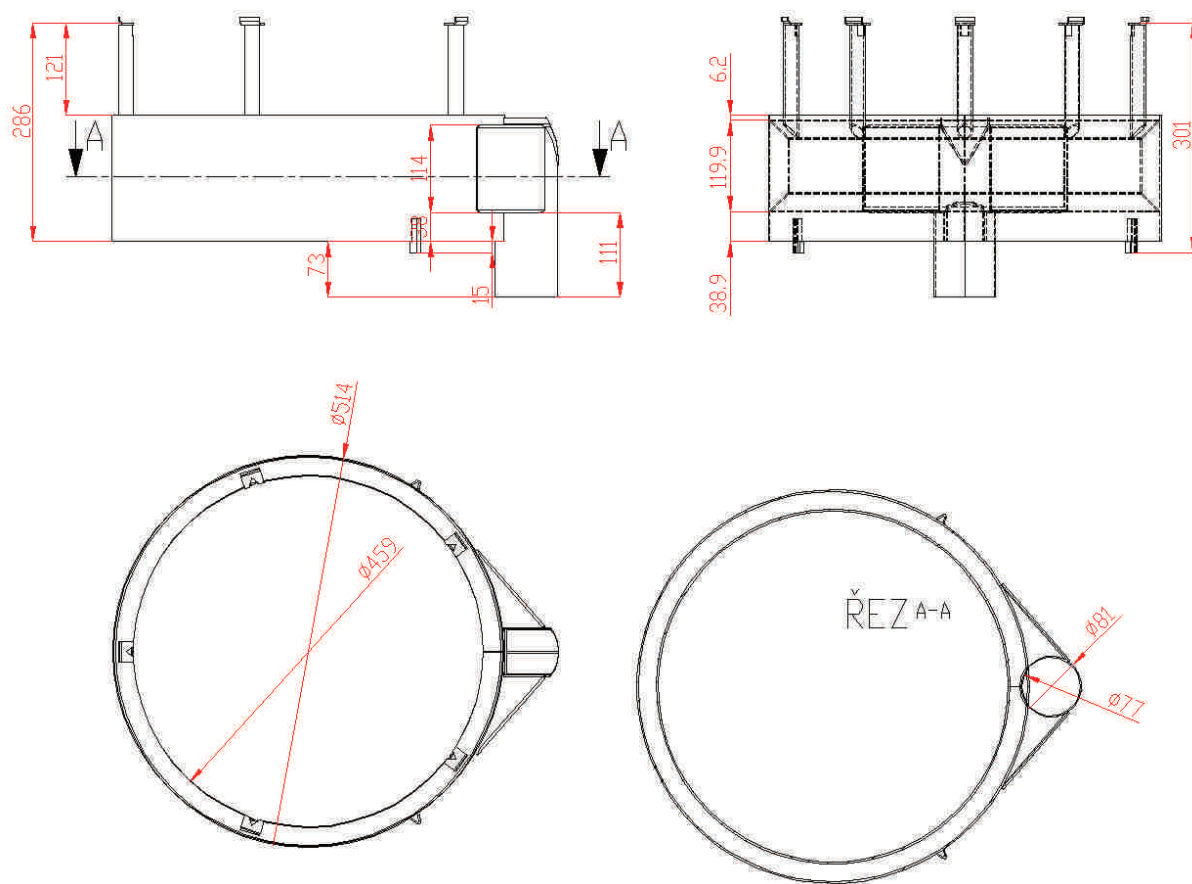


16 PŘÍLOHA 2





17 PŘÍLOHA 3



18 PŘÍLOHA 4



Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě
Centrum hygienických laboratoří
Zkušební laboratoř č. 1393 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025
Partyzánské náměstí 7, 702 00 Ostrava

PROTOKOL č. 43088/2014

Zákazník : VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ
UNIVERZITA OSTRAVA
VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM
17. listopadu 15
708 33 Ostrava-Poruba

Číslo zakázky : 26217
Příjem vzorku : 1.8.2014 11:00
Vyšetření vzorku : 1.8.2014 - 6.8.2014
Číslo jednací : ZU/01195/2008
Číslo spisu : S-ZU/01195/2008
Spisový znak : 4.0.3

Číslo objednávky : VEC020/01/08

Vzorek číslo : 79846
Datum odběru : neuvedeno **Čas odběru :** neuvedeno
Název vzorku : Kondenzát z kondenzační jednotky za kotlem 1
Množství vzorku : 250 ml
Místo odběru : VEC
Matrice : voda technologická
Vzorkoval : neuvedeno
Způsob odběru : neuvedeno
Účel odběru : dle požadavku zákazníka

Výsledky zkoušení - chemické vyšetření

Ukazatel	Hodnota	Jednotka	*Limit	TYP	Použitá metoda	Nejistota
naftalen	<0,050	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
acenaftylen	<0,050	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
acenaften	0,060	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±30%
fluoren	<0,050	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
fenanthren	0,042	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±20%
anthracen	0,008	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±20%
fluoranten	0,014	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±20%
pyren	0,010	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±20%
benzo(a)anthracen	<0,005	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
chrysen	<0,005	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
benzo(k)fluoranten	<0,005	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
benzo(b)fluoranten	<0,005	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
benzo(a)pyren	<0,002	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
benzo(ghi)perylene	<0,005	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
dibenzo(ah)anthracen	<0,010	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
indeno(1,2,3-cd)pyren	<0,010	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	-
suma PAU	0,13	µg/l	-	A	SOP OV 331 ³	±20%

Poznámka k odběru : Odběr vzorku není předmětem akreditace.

Poznámky k analýze :

Suma PAU obsahuje tyto PAU: naftalen, acenaften, fluoren, fenanthren, anthracen, fluoranten, pyren, benzo(a)anthracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, benzo(g,h,i)perylene, dibenzo(a,h)anthracen a indeno(1,2,3-cd)pyren.

Vzorek číslo :	79847
Datum odběru :	neuvedeno
Název vzorku :	Kondenzát z kondenzační jednotky za kotlem 2 + 3
Množství vzorku :	2 x 250 ml
Místo odběru :	VEC
Matrice :	voda technologická
Vzorkoval :	neuvedeno
Způsob odběru :	neuvedeno
Účel odběru :	dle požadavku zákazníka

Výsledky zkoušení - chemické vyšetření						
Ukazatel	Hodnota	Jednotka	*Limit	TYP	Použitá metoda	Nejistota
fenoly (fenolový index)	2,2	mg/l	-	A	SOP OV 046 ²	±15%
NL (105°C)	190	mg/l	-	A	SOP OV 025.01 ²	±20%
pH	5,4		-	A	SOP OV 033 ²	±0,3

Poznámka k odběru : Odběr vzorku není předmětem akreditace.

Poznámky k analýze :

K filtraci vzorku pro stanovení nerozpustných látek (NL) byl použit filtr ze skleněných vláken o střední velikosti pórů 0,7 - 1,3 µm.

Upřesnění SOP :

SOP OV 025.01 (ČSN EN 872, ČSN 75 7350)

SOP OV 033 (ČSN ISO 10523)

SOP OV 046 (ČSN ISO 6439)

SOP OV 331 (ČSN EN ISO 17993)

Místo provedení zkoušky (pracoviště) :

⁽²⁾ - analýzy provedeny pracovištěm Ostrava (Partyzánské nám. 7, 702 00 Ostrava)

⁽³⁾ - analýzy provedeny pracovištěm Karviná (Těškovcové 2206, 734 01 Karviná-Mizerov)

Metody v sloupci TYP: "A" akreditovaná zkouška

< - výsledek pod mez detekce, > - výsledek je vyšší než uvedená hodnota

Výsledky se týkají pouze zkoušených vzorků.

Bez písemného souhlasu laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

Uvedené rozšířené nejistoty měření jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %, nezohledňují vlivy odběrů vzorků.

Vedoucí CHL : Doškářová Šárka, RNDr.

Kontroloval : Němcová Vladimíra, Ing.

Protokol vyhotovil: Košárková Jana

Počet stran: 2

Dne: 18.8.2014

Ing. Zdeňka Dardová
vedoucí Oddělení vzorkování a servisu